

การย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

นางสาวกัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEGRADATION OF 17 $\alpha$  - METHYLTESTOSTERONE  
BY ULTRAVIOLET RADIATION

Miss Kattinat Sagulsawasdipan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering  
Department of Environmental Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2012  
Copyright of Chulalongkorn Universit

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน  
ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต

โดย

นางสาวกัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุวรรณ วงศ์ทะเนตร)

กัตตินาฏ สกุศลสวัสดิพันธ์ : การย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต. (DEGRADATION OF 17 $\alpha$  – METHYLTESTOSTERONE BY ULTRAVIOLET RADIATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ, 148 หน้า.

17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน หรือ MT เป็นสเตอรอยด์ฮอร์โมนเพศทำหน้าทีคล้ายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน โดยส่วนใหญ่เกษตรกรจะนิยมนำ MT มาใช้ในการแปลงเพศปลานิล โดยนิยมแปลงเพศปลานิลเพศเมียให้กลายเป็นเพศผู้ ซึ่ง MT จะก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ และยังพบว่า MT เป็นสารรบกวนฮอร์โมนทำให้เกิดความผิดปกติต่อการทำงานในระบบสืบพันธุ์ของสัตว์น้ำ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสลาย MT ด้วยแสงยูวี โดยมีความเข้มข้น MT เริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์ หลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์ และ หลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ ทำการวิเคราะห์โดยการเพิ่มความเข้มข้น MT ด้วยกระบวนการ Solid – Phase Extraction (SPE) วัดความเข้มข้นด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) และศึกษาแนวโน้มการออกซิเดชันหลังการฉายแสงโดยวัดค่าไออาร์พี จากการศึกษาพบว่า UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ สามารถสลาย MT ได้มากที่สุด โดยความเข้มข้น MT ในตัวอย่างลดลงต่ำกว่า 3 ไมโครกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 8 นาที และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่าเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา คือ 0.511 ต่อนาที นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มกำลังวัตต์ของหลอดยูวี พบว่าอัตราการสลาย MT จะมากขึ้นตามกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้น โดย UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์ เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที มีความเข้มข้น MT เหลืออยู่ในตัวอย่างร้อยละ 12.41 สำหรับกำลังวัตต์ 20 และ 40 วัตต์ ความเข้มข้น MT ในตัวอย่างลดลงต่ำกว่า 3 ไมโครกรัมต่อลิตร ภายในเวลา 15 และ 8 นาที ตามลำดับ จากผลการวัดค่าไออาร์พี พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าไออาร์พีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มการเกิดออกซิเดชัน และเมื่อพิจารณาพันธะของ MT พบว่าพันธะส่วนมากดูถูกสิ้นแสงได้ดีในช่วงยูวีโดยเฉพาะ UV-C ดังนั้นกลไกการสลายของ MT มีแนวโน้มการเกิดร่วมกันจากทั้ง 2 กลไก คือกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซิเดชัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

## 5370203221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS :  $17\alpha$  - METHYLTESTOSTERONE / ADVANCED OXIDATION PROCESSES / ULTRAVIOLET RADIATION / PHOTOLYSIS

KATTINAT SAGULSAWASDIPAN : DEGRADATION OF  $17\alpha$  - METHYL TESTOSTERONE BY ULTRAVIOLET RADIATION. ADVISOR : ON-ANONG LARPPARISUDTHI, Ph.D., 148 pp.

$17\alpha$ -methyltestosterone or MT is an anabolic steroid which has function similar to testosterone. Most fish farmers are used MT to modify sex of Nile tilapia from female to male. MT is a human carcinogen and also acts as an endocrine disrupting compound, which may disturb the normal functions of endocrine and reproductive systems of aquatic animals. This study was to investigate the degradation of MT using UV radiation. The initial concentration of MT was 100 micrograms per liter. The irradiation with UV-A (18 and 40 watt) UV-B (10 18 and 36 watt) and UV-C (10 20 and 40 watt) respectively. Samples were extracted by Solid – Phase Extraction and analyzed by HPLC. Additionally, the oxidation trend after irradiation were measured by ORP. The results showed that irradiation with UV-C at 40 watts gave the most MT degradation. MT was reduced to less than 3 micrograms per liter in 8 minute. The degradation of MT was found to be first order reaction with the reaction constant of 0.511 per minute. When increased the power of UV lamp, it was found that the degradation rate tended to be increased. After 30 minutes of irradiation by UV-C lamp at 10 watts, the remaining concentration of MT was 12.41 percent. For 20 watt and 40 watts of UV-C irradiation, MT concentrations reduced to be lower than 3 micrograms per liter in 15 and 8 minutes, respectively. The ORP results tended to increase with irradiation time which might show the potential of oxidation reaction. Considering the chemical bonds of MT, it could be observed that most of chemical bonds could absorbed UV especially in UV-C range. As a result, the possible mechanism of MT degradation might be a co-reaction of photolysis and oxidation process.

Department : .....Environmental Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study : .....Environmental Engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year : .....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัย  
จึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำ  
แนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย  
ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์  
ตลอดจนรองศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล  
และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารุวรรณ วงศ์ทะเนตร ที่ได้ให้คำชี้แนะ และแก้ไขวิทยานิพนธ์  
สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน และให้ความรู้

คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้ความช่วยเหลือ และให้  
คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา  
และการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ภายใต้รหัส  
โครงการ FW1017A ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง  
และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

ท้ายสุดนี้ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และดูแลกันและกัน  
ระหว่างการทำงานวิจัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ฮอริโมน.....	5
2.1.1 ประเภทของฮอริโมน.....	5
2.1.2 การสร้างสเตียรอยด์ฮอริโมน.....	9
2.2 ฮอริโมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	10
2.2.1 ผลกระทบจาก 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีต่อมนุษย์.....	13
2.2.2 การแพร่กระจายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเข้าสู่ สิ่งแวดล้อม.....	14
2.2.3 ผลกระทบของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีต่อ สิ่งแวดล้อม.....	15
2.2.4 การศึกษาเกี่ยวกับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีผลต่อการ เจริญเติบโตของปลา.....	16
2.2.5 การศึกษาเกี่ยวกับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีผลต่อ ระบบสืบพันธุ์ของปลา.....	17
2.3 การแปลงเพศปลาโดยใช้ฮอริโมน.....	17

	หน้า
2.3.1 การนำ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมาใช้ในการแปลงเพศปลา นิล.....	18
2.4 กระบวนการออกซิเดชัน.....	20
2.4.1 กระบวนการโฟโตไลซิส.....	21
2.5 อนุมูลอิสระ.....	23
2.5.1 ความหมายของอนุมูลอิสระ.....	23
2.5.2 ปฏิกริยาออกซิเดชัน.....	23
2.5.3 ปฏิกริยาของอนุมูลอิสระ.....	23
2.6 รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	24
2.6.1 แหล่งกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	25
2.6.2 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	29
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.7.1 ฮอริโมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	30
2.7.2 อิทธิพลของแสงต่อฮอริโมน.....	31
2.7.3 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง.....	34
2.7.4 การวัดค่าไออาร์พีในกระบวนการออกซิเดชัน.....	38
2.7.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 แผนการทดลอง.....	43
3.2 ตัวแปรในการทดลอง.....	44
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.4 สารเคมีและอื่นๆ.....	45
3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ.....	46
3.6 การออกแบบตั้งปฏิกริยา.....	46
3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction.....	47
3.8 การดำเนินงานวิจัย.....	49
3.8.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำสังเคราะห์.....	49



	หน้า
3.8.2 การฉายแสงผ่านถึงปฏิกิริยา.....	50
3.8.3 การเก็บตัวอย่างน้ำ.....	50
3.8.4 การวัดปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเทอโรน และคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์.....	51
3.8.5 การวิเคราะห์หาอนุโมลอิสระในน้ำ.....	53
3.8.6 การจำแนกผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิล เทสโทสเทอโรน.....	57
3.8.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	57
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	58
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction และ การวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเทอโรน.....	58
4.1.1 การศึกษาสารในภาชนะที่ใช้และตัวชะละลายที่เหมาะสม.....	59
4.1.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความเข้มข้น.....	60
4.1.3 การศึกษา Internal Standard ที่เหมาะสม.....	61
4.1.4 สรุปการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction และการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเทอโรน.....	63
4.2 ศึกษาการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเทอโรนด้วยแสง อัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C และกำลังวัตต์ ต่างๆและคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์.....	63
4.2.1 การทดลองด้วยชุดควบคุม.....	64
4.2.2 การฉายแสงด้วยหลอด UV-A.....	64
4.2.3 การฉายแสงด้วยหลอด UV-B.....	65
4.2.4 การฉายแสงด้วยหลอด UV-C.....	67
4.2.5 การวิจารณ์ผลการศึกษา.....	69
4.2.6 การนำผลการศึกษาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเทอโรน ด้วยการฉายแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ มาประยุกต์ใช้.....	72

	หน้า
4.2.7 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิล เทสโทสเตรอโรน.....	73
4.3 การวิเคราะห์ห่อนุผลอิสระในน้ำ.....	77
4.3.1 การวิเคราะห์ห่อนุผลอิสระในน้ำด้วยวิธีไอโอโดเมตริก ไทเทรต.....	77
4.3.2 การวิเคราะห์ห่อนุผลอิสระในน้ำด้วยวิธี DPPH.....	78
4.3.3 การวิเคราะห์ค่าออกซิเดชันในน้ำด้วยการวัดค่าไออาร์พี.....	78
4.3.4 การวิเคราะห์แนวโน้มการออกซิเดชันด้วยแสงยูวีสำหรับการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตรอโรน .....	84
4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทส โทสเตรอโรน.....	85
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง.....	98
ภาคผนวก ข รายการการคำนวณ.....	103
ภาคผนวก ค ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction.....	112
ภาคผนวก ง ผลการทดลองการวัดปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิล เทสโทสเตรอโรน.....	116
ภาคผนวก จ ผลการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยา.....	126
ภาคผนวก ฉ ผลการวิเคราะห์ห่อนุผลอิสระในน้ำ.....	136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	148

## สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	12
2.2 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	26
2.3 หน่วยของการวัดรังสี.....	29
2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ).....	42
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	46
3.2 การเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆตามช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์.....	51
3.3 การวัดค่าความไออาร์พีสำหรับชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างเวลาต่างๆตามช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์.....	56
4.1 ค่า % recovery ของสารในภาชนะที่ใช้และตัวชะละลายต่างๆ.....	60
4.2 ค่า % recovery ของอัตราส่วนต่างๆสำหรับการเพิ่มความเข้มข้น.....	62
4.3 ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน.....	73
4.3 ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน (ต่อ).....	74
4.3 ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน (ต่อ).....	75
4.3 ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน (ต่อ).....	76
4.4 พลังงานที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ร้อยละ 90 ของช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ต่างๆ.....	76
ข.1 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของช่วงความยาวคลื่น UV-A.....	108
ข.2 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของช่วงความยาวคลื่น UV-B.....	109
ข.3 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของช่วงความยาวคลื่น UV-C.....	109
ตารางที่	หน้า
ค.1 ค่า % recovery ของสารในภาชนะที่ใช้และตัวชะละลายต่างๆ.....	113

ตารางที่	หน้า
ค.2 ค่า % recovery ของอัตราส่วนต่างๆสำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	114
ค.3 ค่า % recovery ของกรดนาดีซิกและ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการวิเคราะห์ internal standard.....	115
ง.1 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนของชุดควบคุม.....	117
ง.2 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	118
ง.3 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	119
ง.4 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	120
ง.5 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	121
ง.6 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์.....	122
ง.7 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	123
ง.8 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์.....	124
ง.9 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	125
จ.1 คุณภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาของชุดควบคุม.....	127
จ.2 คุณภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	128
จ.3 คุณภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	129
จ.4 คุณภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	130

ตารางที่	หน้า
๑.5 คุณสมบัติของน้ำในถังปฏิบัติการหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	131
๑.6 คุณสมบัติของน้ำในถังปฏิบัติการหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์.....	132
๑.7 คุณสมบัติของน้ำในถังปฏิบัติการหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	133
๑.8 คุณสมบัติของน้ำในถังปฏิบัติการหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์.....	134
๑.9 คุณสมบัติของน้ำในถังปฏิบัติการหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	135
๑.1 ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับวิธีการทดลองที่ 1.....	137
๑.2 ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับวิธีการทดลองที่ 2.....	138
๑.3 ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH.....	139
๑.4 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	140
๑.5 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	141
๑.6 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	142
๑.7 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	143
๑.8 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์.....	144
๑.9 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	145

ตารางที่	หน้า
จ.10 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำดีตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์.....	146
จ.11 ค่าความของชุดควบคุมและน้ำดีตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลัง วัตต์ 40 วัตต์.....	147

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของเทสโทสเตอโรน.....	11
2.2 โครงสร้างทางเคมีของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน.....	11
2.3 ช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	26
3.1 ขั้นตอนการศึกษา.....	43
3.2 ถึงปฏิกิริยา.....	47
3.3 ลักษณะอุปกรณ์สำหรับการฉายแสงผ่านถึงปฏิกิริยา.....	50
4.1 ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์.....	65
4.2 ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์.....	67
4.3 ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์.....	69
4.4 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	79
4.5 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	80
4.6 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์.....	80
4.7 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์.....	81
4.8 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์.....	82
4.9 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์.....	82
4.10 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์.....	83

ภาพที่	หน้า
4.11 โคโรมาโตกราฟีวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง(HPLC) ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	85
4.12 ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 18 วัตต์ ที่เริ่มต้นความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	87
ก.1 เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง.....	99
ก.2 ส่วนประกอบของเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง.....	100
ก.3 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง.....	101
ข.1 ถังปฏิกิริยา.....	104
ข.2 การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ ปฏิกิริยาลำดับที่ 0.....	107
ข.3 การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ ปฏิกิริยาลำดับที่ 1.....	108



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเพาะเลี้ยงปลาในประเทศไทย เป็นอาชีพที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ประเทศไทยมีการส่งออกปลาทั้งปลาเศรษฐกิจและปลาสวยงามในแต่ละปี ประมาณ 100 ล้านบาท โดยเฉพาะปลานิลนับเป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ เพราะปัจจุบันความต้องการปลานิลไม่ว่าจะเป็นตลาดภายในประเทศ หรือแม้กระทั่งตลาดในต่างประเทศได้เพิ่มปริมาณความต้องการมากขึ้นเป็นลำดับ เนื่องจากปลานิลเป็นปลาที่เลี้ยงง่าย และมีรสชาติดี กำลังเป็นที่นิยมจากผู้บริโภค อีกทั้งยังเป็นปลาที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากปลานิลเพศผู้เมื่อเทียบกับปลานิลเพศเมียแล้วจะมีขนาดใหญ่กว่า และมีอัตราการเจริญเติบโตมากกว่า 2 เท่า จึงนิยมแปลงเพศปลาโดยใช้ฮอร์โมน เพื่อให้ได้ปลานิลเพศผู้เพียงพอ และตรงตามความต้องการของตลาด (อุดม เรืองนพคุณ, 2548)

มีฮอร์โมนหลายชนิดที่มีผลต่อการกระตุ้นหรือเร่งให้ปลาเกิดการเปลี่ยนแปลงเพศ แต่ฮอร์โมนที่นิยมนำมาใช้มากคือ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 $\alpha$ -Methyltestosterone) หรือ MT โดย MT เป็นสเตอรอยด์ฮอร์โมนเพศที่สามารถสังเคราะห์ได้ ทำหน้าที่คล้ายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนซึ่งสร้างจากระบบสืบพันธุ์เพศชาย MT ทำหน้าที่ในการแสดงลักษณะที่เป็นเพศผู้ ควบคุมการพัฒนาของอวัยวะสืบพันธุ์ (Reynold, 1993) โดยการให้อาหารที่ผสม MT กับลูกปลา ในอัตราส่วน MT 60 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับการแปลงเพศปลาที่เลี้ยงในบ่อที่มีอาหารธรรมชาติสูง และในอัตราส่วน MT 40 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับบ่อที่ไม่มีอาหารธรรมชาติหรือมีปริมาณอาหารธรรมชาติค่อนข้างต่ำ เป็นระยะเวลา 21 วัน (อุดม เรืองนพคุณ, 2548) การใช้ MT อย่างแพร่หลายและปริมาณการให้อาหารมากเกินไปกับลูกปลา ทำให้เกิดการตกค้างของ MT จากกระบวนการแปลงเพศปลา ซึ่งจะเกิดการสะสมอยู่ในบ่อเลี้ยงปลา และมีการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรงเมื่อมีการทำความสะอาดบ่อเลี้ยงปลา ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีมีการตรวจพบถึงปริมาณ MT ตกค้างในสิ่งแวดล้อมในระดับที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่สามารถตรวจพบการปนเปื้อนของ MT ในตะกอนดินระดับความเข้มข้นต่ำช่วงนาโนกรัมต่อกรัม จากการศึกษายังพบความเข้มข้นของ MT ในน้ำจากบ่อแปลงเพศปลา 3.6 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งความเข้มข้นจะลดลง

จนระดับความเข้มข้นคงที่ในเวลา 1 สัปดาห์ (Fitzpatrick, 2000) โดย MT จะส่งผลกระทบต่อระบบต่อมไร้ท่อของมนุษย์และสัตว์น้ำ เมื่อมีการสะสม MT ในร่างกายมนุษย์เป็นระยะเวลา นาน MT จะไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อในร่างกาย ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ เช่น โรคมะเร็งต่อมลูกหมากในผู้ชาย และโรคมะเร็งตับในผู้หญิง อีกทั้งยังมีผลต่อการทำงานของหัวใจ ระบบสืบพันธุ์โลหิต รวมทั้งการทำงานของตับผิดปกติอีกด้วย (Roberts และ Essenhig, 1986 )

ปัจจุบันมีข้อมูลเกี่ยวกับการสลาย MT อยู่น้อย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการสลาย MT ในน้ำ โดยใช้แสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลาย MT รวมทั้งการวิเคราะห์อนุมูลอิสระเพื่อให้ทราบแนวโน้มสำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสง เพื่อลดผลกระทบของ MT ต่อมนุษย์และสัตว์น้ำ โดยการใส่แสงอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงยูวีอาจจะทำให้เกิดกระบวนการโฟโตไลซิสหรืออาจทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการโฟโตไลซิสเป็นการให้แสงที่มีพลังงานพอดีกับพลังงานพันธะ เพื่อให้เกิดการดูดกลืนคลื่นแสงของสาร เมื่อสารได้รับพลังงานที่เหมาะสมแล้ว จะเข้าสู่สถานะที่มีพลังงานสูงขึ้น เป็นสถานะที่สารเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยจะเกิดการแตกตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อไป (Parsons, 2004)

กระบวนการออกซิเดชัน แสงจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ ได้เป็นอนุมูลอิสระอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเกิดการออกซิเดชันกับสารต่อไป โดยจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ (De Lasa และคณะ, 1992)

งานวิจัยนี้จะช่วยลดผลกระทบของ MT ที่เกิดขึ้นกับมนุษย์และสัตว์น้ำ และยังเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับเกษตรกรหากต้องการบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาที่มี MT ตกค้างอยู่ด้วยวิธีปล่อยน้ำทิ้งไว้ให้ไว้รับแสงแดดตามธรรมชาติเพื่อให้เกิดการสลาย MT

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ด้วยแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C รวมทั้งกำลังวัตต์ที่เหมาะสม และวิเคราะห์อนุโมลอิสระเพื่อให้ทราบแนวโน้มสำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสง
- 1.2.2 เพื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในน้ำด้วยแสงยูวี

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัยได้แก่

- 1.3.1 น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ตามความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ต้องการ ทำการทดลองในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท (Batch Reactor)
- 1.3.2 ใช้แสงยูวีในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ และกำลังวัตต์ที่เหมาะสมในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน
- 1.3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ วัตถุประสงค์ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนและวิเคราะห์อนุโมลอิสระหลังการฉายแสงด้วยหลอดยูวี

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพในการใช้แสงยูวีต่อการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในช่วงความยาวคลื่นต่างๆและกำลังวัตต์ที่เหมาะสม
- 1.4.2 ทราบถึงแนวโน้มการออกซิเดชันด้วยแสงยูวี
- 1.4.3 เป็นแนวทางการลดมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากผลกระทบของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม
- 1.4.4 สามารถนำข้อมูลจากการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจากน้ำในบ่อแปลงเพศปลาก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ฮอริโมน

ฮอริโมนเป็นสารที่สร้างมาจากต่อมไร้ท่อ (Endocrine Glands) ซึ่งมีอยู่ในสัตว์ทุกชนิด ฮอริโมนมีหน้าที่สำคัญหลายอย่างต่อสัตว์ที่มีกระดูกสันหลัง และไม่มีกระดูกสันหลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับการสืบพันธุ์ การเจริญเติบโต การเปลี่ยนวัย การลอกคราบ การเผาผลาญ การควบคุมการดูดซึมของเหลวในร่างกาย ตลอดจนการตอบสนองของความเครียดในสัตว์น้ำ (จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์, 2540)

##### 2.1.1 ประเภทของฮอริโมน

โดยทั่วไปฮอริโมนสามารถแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้ (Norman และ Litwack, 1997)

##### 1. เปปไทด์หรือโปรตีนฮอริโมน (Peptide and Protein Hormones)

เป็นฮอริโมนที่ถูกสร้างขึ้นมาจากกรดอะมิโน ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (Peptide Bonds) โดยจะมีหมู่อะมิโน ( $\text{NH}_2$ ) อยู่ด้าน N-terminal และหมู่คาร์บอกซิล ( $\text{COOH}$ ) อยู่ด้าน C-terminal ปรากฏอยู่ในโครงสร้างของเปปไทด์ฮอริโมน จำนวนกรดอะมิโนที่พบในเปปไทด์ฮอริโมน มีตั้งแต่ 3 ตัว จนถึงมากกว่า 180 ตัว (Hadley, 1988) ทำให้สามารถจำแนกเปปไทด์ฮอริโมน ออกเป็นกลุ่มย่อยลงไปได้อีก เช่น เปปไทด์ฮอริโมนที่มีกรดอะมิโนจำนวนน้อย (Small Peptides) เปปไทด์ฮอริโมนที่มีกรดอะมิโนจำนวนมาก (Large Peptides) และเปปไทด์ฮอริโมนที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ (Protein or Polypeptide) ขึ้นอยู่กับจำนวนของกรดอะมิโนที่เรียงต่อกัน โปรตีนฮอริโมนบางชนิดอาจมีคาร์โบไฮเดรตมาเกาะอยู่ (Conjugate) เรียกว่า ไกลโคโปรตีนฮอริโมน (Glycoprotein Hormone) เช่น ฟอลลิเคิล สติมูเลตติ้ง ฮอริโมน (Follicle Stimulating Hormone, FSH) ลูทีไนซิง ฮอริโมน (Luteinizing Hormone, LH) ไทรอยด์ สติมูเลตติ้ง ฮอริโมน (Thyroid

Stimulating Hormone, TSH) และฮิวแมน โคลิโอนิก โกนาโดโทรปิน (Human Chorionic Gonadotropin, HCG)

## 2. เอมีนฮอร์โมน (Amine Hormone)

เป็นฮอร์โมนที่มีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบ แต่อาจมีคุณสมบัติคล้ายกับเปปไทด์หรือโปรตีนฮอร์โมน และสเตียรอยด์ฮอร์โมน จึงนิยมที่จะแยกฮอร์โมนเหล่านี้ออกมาต่างหากเช่น ฮอร์โมนไทรอกซีน (Thyroxine,  $T_4$ ) และฮอร์โมนไตรไอโอดไทโรนีน (Tri-Iodothyronine,  $T_3$ ) ซึ่งผลิตจากต่อมไทรอยด์ ฮอร์โมนแคทีโคลามีน (Catecholamines) ซึ่งถูกผลิตจากต่อมหมวกไตส่วนใน (Adrenal Medulla) และฮอร์โมนเมลาโทนิน (Melatonin) ซึ่งผลิตโดยต่อมไพเนียล (Pineal gland) ต่างก็จัดเป็นเอมีนฮอร์โมน

ฮอร์โมนไทรอกซีนและฮอร์โมนไตรไอโอดไทโรนีน ถูกสร้างขึ้นมาจากสารตั้งต้นไกลโคโปรตีนที่เรียกว่า ไทโรโกลบูลิน (Thyroglobulin) ซึ่งจะมีการเติมไอโอดีนเข้าไปในกรดอะมิโนไทโรซีน (Tyrosine) ส่วนฮอร์โมนแคทีโคลามีน เช่น อะดรีนาลีน (Adrenaline) และนอร์อะดรีนาลีน (Noradrenaline) ถูกสร้างขึ้นมาจากกรดอะมิโนไทโรซีนภายในต่อมหมวกไตส่วนใน

## 3. สเตียรอยด์ฮอร์โมน (Steroid Hormones)

เป็นฮอร์โมนที่ถูกสร้างขึ้นมาจากโคเลสเตอรอล (Cholesterol) และมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีลักษณะเป็นวงแหวน 4 วง (A, B, C, D) เชื่อมติดกันเรียกว่า ไฮโดรเพนตาโนเพอไฮโดรฟีแนนทริน (Cyclopentanoperhydrophenanthrene Ring) โดยสามวงแรก (A, B, C) เป็น Cyclohexane และวงที่สี่ (D) เป็น Cyclopentane จำนวนคาร์บอนและอนุมูล (Group) ต่างๆเช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) คีโตน (Ketone) และอัลดีไฮด์ (Aldehyde) ที่มีบนโครงสร้างพื้นฐานนี้เป็นตัวกำหนดถึงความจำเพาะ (Specificity) ของสเตียรอยด์ฮอร์โมนชนิดต่างๆ โดยมีคาร์บอน (Carbon) และไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็นองค์ประกอบของวงแหวนเหล่านั้น

ตำแหน่งคาร์บอนที่เป็นโครงสร้างของสเตียรอยด์ฮอร์โมนมีลักษณะเฉพาะ และสามารถให้ตัวเลขตั้งแต่ 1 ถึง 27 แสดงถึงตำแหน่งคาร์บอนของสเตียรอยด์ฮอร์โมนทุกชนิด ไฮโดรเจนอะตอม

ที่เกาะอยู่กับคาร์บอนแต่ละตัว อาจอยู่เหนือพื้นราบของโมเลกุล โดยนิยมให้เครื่องหมายนำหน้าเป็นเบต้า ( $\beta$ ) พร้อมกับแสดงโครงสร้างเป็นเส้นทึบ หรืออาจอยู่ข้างใต้พื้นราบโดยใช้เครื่องหมายนำหน้าเป็นแอลฟา ( $\alpha$ ) และแสดงด้วยเส้นประเป็นจุดๆ

โดยทั่วไปสารต้นกำเนิดหรือสารตั้งต้นของสเตียรอยด์ฮอร์โมน แบ่งตามจำนวนคาร์บอนได้เป็น 3 กลุ่ม คือ เอสเทรอน (Estrane,  $C_{18}$ ) แอนโดรสเทน (Androstane,  $C_{19}$ ) และเพรกเนน (Pregnane,  $C_{21}$ ) โดยมีโคเลสเตอรอล (Cholesterol,  $C_{27}$ ) ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นตัวหลัก (Parent compound) สารตั้งต้นกำเนิดเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในระหว่างการสังเคราะห์สเตียรอยด์ฮอร์โมนซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

3.1 เอสโตรเจน (Estrogens) เอสโตรเจนเป็นสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่มีคาร์บอนอยู่ 18 อะตอม (C 18-Steroids) เช่น ฮอร์โมนเอสตราไดออล (Estradiol) และฮอร์โมนเอสโตรน (Estrone) เป็นต้น ฮอร์โมนเหล่านี้ผลิตโดยรังไข่ และทำหน้าที่เกี่ยวกับการแสดงออกของลักษณะทางเพศหญิง (Secondary Sexual Characteristics) ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมและควบคุมการสร้างไข่แดง (Vitellogenesis) ของสัตว์มีกระดูกสันหลังที่ไม่ใช่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Nonmammalian vertebrates) เช่น ปลา เป็นต้น โดยฮอร์โมนเอสตราไดออล มีการสังเคราะห์ฮอร์โมนเอสโตรเจนขึ้นจากสารเคมี และมีประสิทธิภาพในการออกฤทธิ์สูงได้แก่ Diethyl stilbestrol (DES) Dienestrol และ Hexestrol นอกจากนี้ยังมีการผลิตออกมาในรูปแบบของเม็ดมีชื่อทางการค้าต่างๆหลายชนิด เช่น Ethinyl estradiol (EE) หรือ Progonon C , Diethyl stilbestrol (DES) และ Premarin เป็นต้น

3.2 โปรเจสโตเจน (Progestogens) เป็นสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่มีคาร์บอนอยู่ 21 อะตอม (C 21-Steroids) เช่น ฮอร์โมนโปรเจสเตอโรน (Progesterone) และฮอร์โมน  $17, 20\beta$ -Dihydroxy-4-Pregnen-3-one ( $17, 20 \beta$ P) เป็นต้น ฮอร์โมนในกลุ่มนี้ส่วนมากผลิตโดยรังไข่ทำหน้าที่ควบคุมการตั้งครรภ์ให้เป็นไปตามปกติในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่ในสัตว์เพศเมียอื่นๆ เช่นปลากระดูกแข็ง พบว่าฮอร์โมนเหล่านี้ทำหน้าที่ในการทำให้ไข่แก่เต็มที่ (Final Maturation) และทำให้เจอร์มินอลเวสทิเคิลภายในปลาแตกออก (Germinal Vesicle Breakdown หรือ GVBD) ซึ่งเป็นลักษณะของไข่ปลาที่พร้อมจะปฏิสนธิ โปรเจสโตเจนจะผลิตได้บ้างในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมเพศผู้โดยผลิตจากอัณฑะ ในปัจจุบันมี

การสังเคราะห์ฮอร์โมนโปรเจสเตอโรน ซึ่งออกฤทธิ์คล้ายกับ โปรเจสเตอโรนในธรรมชาติ มาก เรียกว่าสารโปรเจสโตรเจน (Progestogen Substance) ซึ่งได้แก่อนุพันธ์ของ โปรเจสเตอโรน เช่น Dydrogesterone อนุพันธ์ของเมสโตสเตอโรน อนุพันธ์ของ 19-Nor testosterone อนุพันธ์ของ 17-Hydroxy progesterone เป็นต้น

3.3 คอร์ติโคสเตียรอยด์ (Corticosteroids) เป็นสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่มีคาร์บอนอยู่ 21 อะตอม โดยจะมีหมู่ไฮดรอกซิลเกาะอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 21 (21-Hydroxylated C 21-Steroids) เช่น ฮอร์โมนในกลุ่มกลูโคคอร์ติคอยด์ (Glucocorticoids) และมีเมินอราโรคอร์ติคอยด์ (Mineralocorticoids) ซึ่งต่างก็ผลิตโดยต่อมหมวกไตส่วนนอก เช่น ฮอร์โมนคอร์ติซอล (Cortisol) ฮอร์โมนคอร์ติโคสเตียรอยด์ (Corticosterone) ฮอร์โมนอัลโดสเตียรอยด์ (Aldosterone) และฮอร์โมนดีออกซิคอร์ติโคสเตียรอยด์ (Deoxycorticosterone) เป็นต้น ฮอร์โมนเหล่านี้ทำหน้าที่ควบคุมการขับถ่ายเกลือแร่ (Salt and Mineral Balance) และเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate Metabolism)

3.4 แอนโดรเจน (Androgens) เป็นสเตียรอยด์ฮอร์โมนที่มีคาร์บอนอยู่ 19 อะตอม (C 19-Steroids) เช่น ฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (Testosterone) ฮอร์โมนไดไฮโดรเทสโทสเตอโรน (Dihydrotestosterone) ฮอร์โมน 11-คีโตเทสโทสเตอโรน (11-Ketotestosterone) และฮอร์โมนแอนโดรสทีนไดโอน (Androstenedione) เป็นต้น ฮอร์โมนเหล่านี้ส่วนมากผลิตในอัณฑะ โดยฮอร์โมนบางส่วนอาจผลิตได้จากรังไข่และต่อมหมวกไต หน้าที่หลักของฮอร์โมนเหล่านี้คือ ควบคุมพฤติกรรมทางเพศชาย (Male Sexual Behavior) และการแสดงออกของลักษณะเพศชาย (Secondary Sexual Characteristics) ของสัตว์มีกระดูกสันหลังทั่วไป แอนโดรเจนที่สำคัญคือ เทสโทสเตอโรน (Testosterone) (มณฑิรา ตันท์เกยูร, 2541) โดยมีการสกัดแอนโดรเจนใน รูปเม็ด เช่น เมทิลเทสโทสเตอโรนและในรูปแคปซูล เช่น Testosterone Undecanoate



### 2.1.2 การสร้างสเตียรอยด์ฮอร์โมน

การสังเคราะห์สเตียรอยด์ฮอร์โมนทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นเอสโตรเจน แอนโดรเจน โปรเจสเตอโรน กลูโคคอร์ติคอยด์ และมีเนอราโร คอร์ติคอยด์ ส่วนมากถูกสังเคราะห์ขึ้นที่ต่อมหมวกไตส่วนนอก รังไข่ และอัณฑะซึ่งเป็นอวัยวะหลักที่ผลิตสเตียรอยด์ฮอร์โมน การสังเคราะห์สเตียรอยด์เหล่านี้ใช้โคเลสเตอรอล (Cholesterol) เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ฮอร์โมน โดยมีขั้นตอนการสังเคราะห์เริ่มจาก อะซิเตท (Acetate) ถูกเปลี่ยนรูปเป็น 3-Hydroxy-3-Methylglutaryl Coenzyme A (HMG CoA) ซึ่งต่อมาจะถูกเอนไซม์ 3-Hydroxy-3-Methylglutaryl Coenzyme A Reductase (HMG CoA Reductase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ควบคุมการผลิตโคเลสเตอรอล (Rate-Limiting Enzyme) เปลี่ยนมาเป็น เมวาโลเนท (Mevalonate) เพื่อใช้ในการสังเคราะห์โคเลสเตอรอล จากนั้นโคเลสเตอรอลจะถูกลำเลียงเข้าไปในไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) เพื่อผลิตฮอร์โมนเพรกนีโนโลน (Pregnenolone) โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ในระบอบไซโตโครม 450 (Side Chain Cleavage P-450) เพื่อตัดจำนวนคาร์บอนของโคเลสเตอรอลจาก 27 อะตอม ให้เหลือ 21 อะตอมได้เป็นฮอร์โมนเพรกนีโนโลน ในขั้นตอนต่อมา ฮอร์โมนเพรกนีโนโลนถูกลำเลียงออกจากไมโทคอนเดรีย เข้าไปในเอนโดพลาสมิกเรติคูลัมชนิดเรียบ (smooth endoplasmic Reticulum) ซึ่งจะมีเอนไซม์หลายชนิดสำหรับเปลี่ยนฮอร์โมนเพรกนีโนโลน ให้เป็นสเตียรอยด์ชนิดอื่นๆ เช่น แอนโดรเจน เอสโตรเจน โปรเจสเตอโรน หรือคอร์ติโคสเตียรอยด์ โดยการตัดจำนวนคาร์บอนจาก 21 อะตอม ให้เหลือ 19 และ 18 อะตอม

การสังเคราะห์ฮอร์โมนเพรกนีโนโลนจากโคเลสเตอรอล เริ่มจากเอนไซม์ 22-Hydroxylase เปลี่ยนโคเลสเตอรอลให้เป็น 22 R-Hydroxycholesterol ซึ่งต่อมาจะถูกเอนไซม์ 20 $\alpha$ -Hydroxylase เปลี่ยนรูปเป็น 20 $\alpha$ , 22 R-Dihydroxycholesterol จากนั้นเอนไซม์ C20-22 lyase จะตัดคาร์บอน (Fission) ระหว่างตำแหน่งที่ 20 และ 22 ออกทำให้เหลือคาร์บอนอยู่ 21 ตัว ได้เป็นฮอร์โมนเพรกนีโนโลน และไอโซคาโปรอิก อัลดีไฮด์ (Isocaproic aldehyde) ซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 6 ตัว

การสังเคราะห์สเตียรอยด์ฮอร์โมนชนิดอื่นๆ ในเอนโดพลาสมิก เรติคูลัมชนิดเรียบ เริ่มจากฮอร์โมนเพรกนีโนโลนเปลี่ยนรูปมาเป็น ฮอร์โมน 17 แอลฟา-ไฮดรอกซีเพรกนีโนโลน (17 $\alpha$ -Hydroxypregnenolone) โดยเอนไซม์ 17 $\alpha$ -Hydroxylase หรือ เปลี่ยนรูปมาเป็นฮอร์โมนโปรเจสเตอโรน (Progesterone) โดยเอนไซม์ 3 $\beta$ -Hydroxysteroid Dehydrogenase (3 $\beta$ -HSD)

จากนั้นฮอร์โมน 17 $\alpha$ -ไฮดรอกซีเพร็กนีโนโลนจะถูกเอนไซม์ C17-20 ตัดคาร์บอนระหว่างตำแหน่งที่ 17 และ 20 ออก ทำให้เหลือคาร์บอนอยู่ 19 อะตอม ได้เป็นดีไฮโดรอีพิแอนโดรสเตอโรน (Dehydroepiandrosterone) ในทำนองเดียวกันฮอร์โมนโปรเจสเตอโรนจะถูกเอนไซม์ 17 $\alpha$ -Hydroxylase เปลี่ยนรูปมาเป็นฮอร์โมน 17 $\alpha$ -Hydroxyprogesterone ซึ่งต่อมาจะถูกเอนไซม์ C-17-20 lyase ตัดคาร์บอนระหว่างตำแหน่งที่ 17 และ 20 ออก ได้เป็นฮอร์โมนแอนโดรสเตอโรนไดโอน (Androstenedione) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของฮอร์โมนเทสโตสเตอโรน (Testosterone) (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2546)

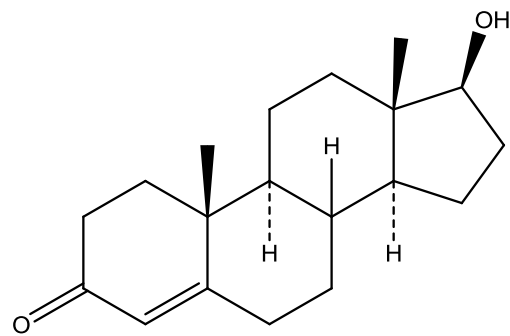
## 2.2 ฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเป็นฮอร์โมนเพศผู้ (Androgenic Hormone) ทำหน้าที่ควบคุมการพัฒนาของอวัยวะสืบพันธุ์ และรักษาลักษณะทางเพศ (Secondary Sex Character) ฮอร์โมนชนิดนี้ในระดับปกติจะกระตุ้นให้เกิดการสร้างสเปิร์ม (Spermatozoa) แต่ถ้ามีระดับสูงกว่าปกติ จะเป็นตัวไปยับยั้งการสร้างสเปิร์ม (Reynolds, 1993)

คุณสมบัติทางกายภาพของฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เป็นสเตอรอยด์สังเคราะห์มีลักษณะเป็นผงผลึกมีสีขาวหรือครีม สภาพคงตัวในอากาศ มีจุดหลอมเหลว 162-168 องศาเซลเซียส ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในแอลกอฮอล์ และอะซีโตน และละลายได้เล็กน้อยในน้ำมันพืช การเก็บรักษาต้องเก็บรักษาในที่ปลอดแสง (Reynolds, 1993) คุณสมบัติของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน แสดงดังตารางที่ 2.1

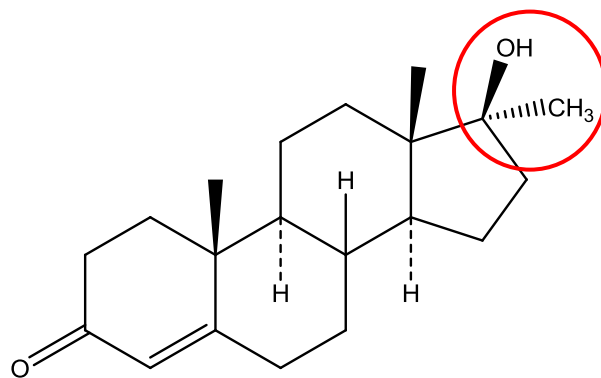
ชื่อทางเคมี 17-Hydroxy-17-methylandro-4-en-3-one

สูตรโครงสร้าง  $C_{20}H_{30}O_2$



Testosterone

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเทสโทสเตอโรน (Vulliet และคณะ, 2010)



Methyltestosterone

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ 17 แอลฟา - เมทิลเทสโทสเตอโรน (Regal และคณะ, 2010)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

คุณสมบัติ	เมทิลเทสโทสเตอโรน
สูตรโมเลกุล	$C_{20}H_{30}O_2$
เลขทะเบียน ซีไอเอส	58-18-4
น้ำหนักโมเลกุล	302.45
สี/รูปร่าง	มีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาวหรือสีครีม
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
จุดหลอมเหลว	162-168 องศาเซลเซียส
ความดันไอ	$1.85 \times 10^{-8}$ มิลลิเมตรปรอท ที่ 25 องศาเซลเซียส
การละลาย	ละลายในเมทานอล เอทานอล อีเทอร์และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ
ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของสารในชั้นน้ำและชั้นออกทานอล (log Kow)	3.36
กฎค่าคงที่ของเฮนรี	$4.7 \times 10^{-9}$ (บรรยากาศ-ลูกบาศก์เมตร)/โมล ที่ 25 องศาเซลเซียส
อัตราค่าคงที่ปฏิกิริยาไฮดรอกซี	$1.0 \times 10^{-10}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/(โมล-วินาที) ที่ 25 องศาเซลเซียส
อัตราค่าคงที่ปฏิกิริยาไอโซน	$1.1 \times 10^{-17}$ ลูกบาศก์เซนติเมตร/(โมล-วินาที) ที่ 25 องศาเซลเซียส

ที่มา : (O'Neil, 2001, Lewis และคณะ, 1997, Hansch และคณะ, 1995, Yalkowsky และคณะ, 2003, US EPA, 2003 อ้างถึงใน ปวีตรา ไซติสุกานต์, 2551)

อนุพันธ์ของเทสโทสเตอโรนที่สังเคราะห์ขึ้นมาในรูปแบบของเอสเทอร์ และแอลคิลเลชัน ทำให้ดูดซึมเข้าถูกแปรสภาพช้า มีฤทธิ์แรงขึ้นและนานขึ้น เมื่อเข้าสู่ร่างกายโดยการฉีดหรือรับประทาน จะต้องมีการไฮโดรไลซ์อนุพันธ์ที่เป็นเอสเทอร์ให้เป็นเทสโทสเตอโรนอิสระก่อน แล้วจึงถูกเปลี่ยนแปลงในร่างกายโดยตับเป็นอวัยวะที่สำคัญในการแปลงสภาพของเทสโทสเตอโรน

กลไกการออกฤทธิ์ของเทสโทสเตอโรนต่อเซลล์เป้าหมายนั้น มีลักษณะเช่นเดียวกับสเตียรอยด์ฮอร์โมนอื่น คือเทสโทสเตอโรนจะแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ เข้าไปจับกับตัวรับภายในเซลล์ (Cytoplasmic Receptor) ซึ่งทำหน้าที่จับแอนโดรเจนโดยเฉพาะ (Androgen Receptor) ได้ สารประกอบเชิงซ้อน (Androgen-Receptor Complex) แล้วผ่านเข้าสู่นิวเคลียสไปจับกับตำแหน่งภายในนิวเคลียส รวมทั้งการเพิ่มการทำงานของโครมาติน และเอนไซม์อาร์เอ็นเอโพลีเมอเรส (RNA Polymerase) ให้มีการสร้างอาร์เอ็นเอทุกชนิดเพิ่มขึ้นแล้วขนส่งเข้าไปเก็บไว้ในไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) เป็นผลให้เกิดการสร้างโปรตีน การเจริญเติบโตของเซลล์ และการเปลี่ยนรูปเพื่อไปทำหน้าที่เฉพาะเซลล์ (ประเสริฐ มีรัตน์, 2538) เทสโทสเตอโรนจะจับกับรีเซปเตอร์ในเซลล์ (Intracellular Receptor) ของอวัยวะเป้าหมายจะได้เป็น Hormone-Receptor Complex ซึ่งจะเข้าไปในนิวเคลียส ออกฤทธิ์ผ่านทาง Specific Hormone Regulatory Element บนโครโมโซมผล จะเพิ่มการสร้างของโปรตีน และ Specific RNAs ซึ่งเชื่อว่าจะทำให้เกิดการสร้างลักษณะความเป็นชาย (Virilization) เกิดขึ้น (สุมนา ชมพูทวีป, 2541)

### 2.2.1 ผลกระทบจาก17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีต่อมนุษย์

แอดแนบอลิก สเตียรอยด์ มีความเป็นไปได้ที่จะเป็นสารก่อมะเร็ง เนื่องจากมันจะไปกระตุ้นการเจริญเติบโตของฮอร์โมนเพศบนเนื้อเยื่อ โดยส่วนใหญ่จะเกิดที่ต่อมลูกหมากในผู้ชาย มะเร็งต่อมลูกหมากจะเกิดการเจริญเติบโตหลังได้รับแอดแนบอลิก สเตียรอยด์ในระยะเวลาานาน (Roberts และ Essenhig, 1986). และยังมีรายงานเกี่ยวกับการเกิดโรคมะเร็งตับจากการได้รับแอดแนบอลิก สเตียรอยด์ (Overly และคณะ, 1984)

การได้รับแอดแนบอลิก สเตียรอยด์ที่ความเข้มข้นสูงเป็นระยะเวลาานาน ทำให้ความดันเลือดสูง หัวใจด้านซ้ายเจริญเติบโตมากเกินไปและโรคหลอดเลือดหัวใจตีบ (McKillop และคณะ, 1986, Bowman, 1990, McNutt และคณะ, 1988 อ้างถึงในปวีตรา โชติสุกานต์, 2551 ) หากได้รับ

แอสบอติก สเตียรอยด์ในระบบทางเดินอาหารจะก่อให้เกิดความผิดปกติในระบบการทำงานของตับ ทำให้การผลิตเอนไซม์ตับสูงผิดปกติ โดยการทดสอบทางชีวเคมีและบางครั้งทำให้เกิดโรคดีซ่าน เกิดความผิดปกติทางจุลกายวิภาคของเนื้อเยื่อก่อให้เกิดโรคตับอักเสบ (Soe และคณะ, 1992) แอนจิโอซาร์โคมา (Angiosarcoma) เป็นมะเร็งที่เกิดจากเส้นเลือดในตับ และยังมีรายงานเกี่ยวกับการเกิดโรคมะเร็งตับในผู้ที่ใช้แอสบอติก สเตียรอยด์ (Overly และคณะ, 1984) ผลกระทบของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะไปลดการหลั่งอินซูลินและส่งผลกระทบต่อการทำงานของตับในผู้หญิง

## 2.2.2 การแพร่กระจายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเข้าสู่สิ่งแวดล้อม

17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนสามารถแพร่ออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยมีการผสมฮอร์โมนลงในยาหรือใช้ผสมลงในอาหาร ใช้ฉีดหรือในบางกรณีเติมฮอร์โมนลงในแหล่งน้ำโดยตรง เพื่อใช้ในการแปลงเพศปลาจากปลาเพศเมียเป็นปลาเพศผู้ การใช้ฮอร์โมนสังเคราะห์จะมีคุณสมบัติเหมือนฮอร์โมนที่ผลิตในร่างกาย โดยจะมีการผสม 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลงในอาหาร 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเหล่านั้นไม่ถูกใช้ไปทั้งหมดในบ่อเพาะเลี้ยง จึงมีความเป็นไปได้ว่า 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะถูกปล่อยออกจากบ่อและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ การปนเปื้อนของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนทำให้ปลาที่เพาะเลี้ยงกินอาหารได้น้อยลง ปริมาณสารอาหารที่ดูดซึมเข้าสู่ตัวปลาลดน้อยลงด้วย ดังนั้นฮอร์โมนที่มีการผสมในอาหารให้ปลาในกระชัง จึงมีการปนเปื้อนออกสู่พื้นที่รอบๆบ่อเลี้ยงปลานอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าปลาสามารถดูดซึมฮอร์โมนได้น้อยลง จึงแพร่เข้าสู่สิ่งแวดล้อมทางมูลและปัสสาวะ (Fitzpatrick, 1999) ในปัจจุบันมีการปรับปรุงวิธีการเพาะเลี้ยงเพื่อลดการเกิดของเสีย แต่อย่างไรก็ตามการสะสมของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้จากการกินอาหารที่ผสม 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนไม่หมด หรือมูล แล้วสะสมในตะกอนภายในกระชัง จึงเกิดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนและฮอร์โมนที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Lunestad, 1992, Jacobsen และ Berglund, 1988 อ้างถึงในพิตรวิฑูรย์, 2551) การศึกษาของ Fitzpatrick และคณะ (1999) พบว่าตะกอนดินที่มีการปนเปื้อนของอาหารที่ผสม 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะมีความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตะกอนดิน 2.8 – 2.9 นาโนกรัม / กรัม หลังการได้รับเป็นระยะเวลา 2 เดือน

นอกจากนี้หลังจากการทำความสะอาดบ่อเลี้ยงปลา ฮอริโมนที่สะสมในตะกอนดินภายในบ่อเลี้ยงปลา จะปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง (Boxall และคณะ, 2004)

### 2.2.3 ผลกระทบของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

สเตียรอยด์ฮอริโมนมีการตรวจพบบ่อยในสิ่งแวดล้อมและส่งผลกระทบต่อระบบต่อมไร้ท่อในสัตว์น้ำที่ระดับความเข้มข้นช่วงนาโนกรัมต่อลิตร (Stumpe และ Marschner, 2007) สารรบกวนการทำงานของต่อมไร้ท่อ (Endocrine disrupting chemicals (EDCs)) คือ สารกลุ่มหนึ่งที่ขัดขวางการทำงาน การผลิต การรับถ่าย การขนส่ง เมตาบอลิซึม หรือการกำจัด ฮอริโมนในร่างกายของสิ่งมีชีวิต (Kavlock, 1991) ส่งผลกระทบต่อต่อมไร้ท่อซึ่งมีผลต่อระดับฮอริโมนเอสโตรเจน เช่น การผลิตไวเทลโลจีนิน (vitellogenin) และการแปลงเพศปลาเพศผู้ (Francesc, 2001) แม้ว่าการศึกษาเรื่องเอสโตรเจนจะได้รับความสนใจเป็นจำนวนมาก แต่มีจำนวนน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของสารรบกวนฮอริโมนต่อแอนโดรเจน เช่น เทสโทสเตอโรน ข้อมูลเกี่ยวกับแอนโดรเจนในสิ่งแวดล้อมยังมีจำนวนจำกัด แต่มีการทดลองกับสิ่งมีชีวิตในน้ำจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ พบว่ามีการตอบสนองทางชีวภาพกับสารรบกวน และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของปลาเพศเมีย (Howell และ Denton, 1989, Thomas และคณะ, 1989)

นอกจากส่งผลด้านสรีรวิทยาแล้ว สเตียรอยด์ฮอริโมน ยังส่งผลต่อสารส่งสัญญาณทางเคมีซึ่งมีความแตกต่างกันระหว่างสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อลักษณะภายนอกและระบบพื้นฐานในสิ่งมีชีวิต เช่น ลักษณะปุ่มบนรากถั่วที่เรียกว่า ไฟโตเอสโตรเจน (phytoestrogens) (ปวีตรา ไซตีสูกานต์, 2551) ไฟโตเอสโตรเจน เป็นสารอินทรีย์ที่สร้างขึ้นโดยพืช แต่มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับฮอริโมนเพศหญิงที่เรียกว่าเอสโตรเจน สารเหล่านี้พบได้ทั้งในส่วนเมล็ด ลำต้น รากหรือดอก โดยในพืช ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารฆ่าเชื้อรา

## 2.2.4 การศึกษาเกี่ยวกับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา

มีรายงานในการศึกษาในปลานิล *Tilapia auera* ที่ได้รับอาหารผสมฮอร์โมน 1-ดีไฮโดรเทสโทสเตอโรน อะซีเตท 17แอลฟา – เอ็นทิลเทสโทสเตอโรน และ 17แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ระดับความเข้มข้น 15, 30 และ 60 ไมโครกรัมต่ออาหาร 1 กรัม ระยะเวลา 25 วัน และเลี้ยงต่อไปอีก 120 วัน ด้วยอาหารที่ไม่ผสมฮอร์โมน พบว่า น้ำหนักเฉลี่ยของปลาที่ได้รับอาหารผสมฮอร์โมนทุกกลุ่มสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (Guerrero, 1995) ขณะที่การศึกษาถึงผลของฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ต่อการเจริญเติบโตและอวัยวะภายนอกของปลา โดยให้ปลาได้รับฮอร์โมนที่ระดับความเข้มข้น 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นระยะเวลา 16 สัปดาห์ พบว่า กลุ่มควบคุมมีการเจริญเติบโตในด้านน้ำหนักและความยาวปลามากที่สุด แสดงว่าฮอร์โมนดังกล่าวไม่ทำให้การเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น และเมื่อระดับความเข้มข้นของฮอร์โมนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเจริญลดลง โดยวัดจากน้ำหนักและความยาวที่ลดลง และพบว่า renosomatic indices (RSI) ของกลุ่มที่ได้รับฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน จะสูงกว่ากลุ่มควบคุม และ hepatosomatic indices (HIS) ของกลุ่มที่ได้รับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 1 และ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะมีค่าสูงกว่ากลุ่มควบคุม ทำให้คาดว่าขณะที่ระดับของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เพิ่มขึ้น จะมีการยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน หรือการเพิ่มขึ้นของการสลายโปรตีนในร่างกาย ขณะเดียวกันก็มีการเพิ่มการสังเคราะห์โปรตีนในอวัยวะภายใน (Simone, 1990 อ้างถึงใน บุญรัตน์ ประทุม และคณะ, 2546) รวมถึงการให้ฮอร์โมนในระดับที่สูงเกินไปส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของปลา ดังรายงานการศึกษาปลาไหล (*Anguilla Anguilla*, L.) ที่ได้รับฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ที่ระดับความเข้มข้น 1, 5, 10, 15 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม วันละ 2 ครั้ง โดยให้ปริมาณวันละ 5 % ของน้ำหนักตัว เป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่าปลาไหลที่ได้รับฮอร์โมนระดับความเข้มข้นที่ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมจะมีน้ำหนักมากกว่าทุกกลุ่ม การทดลองรวมถึงกลุ่มควบคุม และพบว่าอัตราการเจริญเติบโตลดลงเมื่อความเข้มข้นของฮอร์โมนสูงขึ้น (Degani, 1985 อ้างถึงใน บุญรัตน์ ประทุม และคณะ, 2546)



## 2.2.5 การศึกษาเกี่ยวกับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีผลต่อระบบสืบพันธุ์ของปลา

รายงานในการศึกษาผลของฮอร์โมน 1-ดีไฮโดรเทสโทสเตอโรน อะซีเตท, 17 แอลฟา – เอ็นดีทเทสโทสเตอโรน ต่อระบบสืบพันธุ์ ในปลานิล (*Tilapia auera*) ที่ได้รับอาหารผสมฮอร์โมนดังกล่าว โดยทำการตรวจดูลักษณะ พบว่าทุกระดับความเข้มข้นของฮอร์โมน ลักษณะอันตะทั้งภายนอกและภายในไม่แตกต่างจากที่เลี้ยงด้วยอาหารธรรมดา เช่นเดียวกันในอันตะของปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ในระดับ 15 และ 30 ไมโครกรัมต่ออาหาร 1 กรัม ก็พบว่าไม่ต่างกัน ส่วนปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ในระดับ 60 ไมโครกรัมต่ออาหาร 1 กรัม จะทำให้เยื่อเกี่ยวพันงอกออกมา และ germinal epithelium เสื่อมสลายไป จึงไม่พบลักษณะที่เป็นอันตะและรังไข่ (ovotestis) ในปลาทดลอง (Guerrero, 1995 อ้างถึงใน บุญรัตน์ ประทุม และคณะ, 2546)

ในปลาเทร้าและปลาแซลมอน พบว่า เมื่อปลาได้รับฮอร์โมนเพศผู้หรือเพศเมีย ในระยะเวลาที่สั้นเกินไป หรือในปริมาณที่น้อยเกินไปแล้ว จะมีผลทำให้การเปลี่ยนเพศปลาเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ โดยจะมีทั้งอันตะและรังไข่ปรากฏในอวัยวะสืบพันธุ์เดียวกัน เรียกว่า กะเทย (hermaphrodite) ซึ่งเมื่อนำไปตรวจสอบทางเนื้อเยื่อวิทยาพบว่า ทั้งรังไข่ และอันตะที่พบเป็นหมัน (sterile) (Johnstone และคณะ, 1978) และพบว่าในปลาชีวข่าวสารที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมฮอร์โมนเมทิลเทสโทสเตอโรน ในระดับ 12 IU. ต่ออาหาร 1 กรัม จะส่งผลให้เซลล์สืบพันธุ์เสื่อมสลาย (degenerate) ไปอย่างสมบูรณ์ แต่สาเหตุของการเสื่อมสลายต้องทำการวิจัยต่อไป (Yamamoto, 1958)

## 2.3 การแปลงเพศปลาโดยใช้ฮอร์โมน

ในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงปลาทั้งปลาเศรษฐกิจและปลาสวยงาม การเปลี่ยนแปลงเพศปลาบางชนิดจะช่วยให้มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมากยิ่งขึ้น และช่วยให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตเร็วขึ้น ตัวอย่างเช่น กรณีปลานิลการทำให้ปลาเป็นเพศผู้อย่างเดียวจะช่วยให้ปลาเจริญเติบโตเร็วขึ้นเนื่องจากไม่ต้องเสียพลังงาน ในการสร้างและวางไข่ตลอดจนการดูแลลูกปลาวัยอ่อน สำหรับในปลาสวยงามการใช้ฮอร์โมนช่วยเปลี่ยนแปลงเพศจะมีส่วนทำให้ปลาสวยงามขึ้น

อย่างเช่นในกรณีของปลากัด ปลาหมอสี่ ปลาปอมปาดัวร์ และปลาหางนกยูง เป็นต้น ฮอริโมนที่ใช้สำหรับแปลงเพศเป็นพวกสเตอรอยด์ฮอริโมน เช่น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหรือ 17 เบต้า-เอสตาไดออล เพื่อที่จะทำให้ปลาตัวผู้หรือปลาตัวเมียเปลี่ยนแปลงเป็นเพศใดเพศหนึ่ง โดยเฉพาะตามความต้องการ (กรมประมง, 2540)

วิธีการใช้ฮอริโมนในการแปลงเพศปลานั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี (จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์, 2540) ได้แก่

1. การฉีด ส่วนใหญ่จะนิยมฉีดเข้ากล้ามเนื้อบริเวณด้านหลังข้างๆครีบท้อง หรือเข้าช่องท้องโดยแทงเข็มเข้าทางด้านหน้าของทวารหนักหรือทางด้านหลังของครีบท้องผู้ใช้ต้องมีความชำนาญ
2. การฝังในกล้ามเนื้อ โดยการผสมฮอริโมนกับโคเลสเตอรอล แล้วฝังเข้าไปในกล้ามเนื้อด้านหลังหรือฝังเข้าช่องท้อง ใช้ปริมาณฮอริโมนค่อนข้างสูงเพื่อให้ฮอริโมนดูดซึมได้ดี ส่วนใหญ่ใช้กับปลาขนาดใหญ่ในเขตหนาว
3. การจุ่มหรือแช่ในน้ำที่มีฮอริโมน ส่วนใหญ่ใช้กับฮอริโมนสังเคราะห์ ปลาส่วนใหญ่จะได้รับฮอริโมนทุกตัว
4. การผสมในอาหาร เป็นวิธีที่สะดวกที่สุด โดยใช้ฮอริโมนผสมกับอาหารให้ปลากิน สามารถใช้กับอาหารสำเร็จรูปหรืออาหารที่มีชีวิต วิธีนี้ปลาอาจได้รับฮอริโมนไม่เพียงพอในกรณีที่ปลาไม่ค่อยกินอาหาร

### 2.3.1 การนำ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมาใช้ในการแปลงเพศปลานิล

วิธีการผลิตปลานิลเพศผู้ด้วยวิธีการตัดเพศ การผสมข้ามพันธุ์ และการผลิตปลานิลเพศผู้ Genetically Male Tilapia (GMT) นั้น มีกระบวนการผลิตที่ยุ่งยากในการปฏิบัติและการจัดการ และเกิดปัญหาในด้านต่างๆกล่าวคือ การตัดเพศมีความยุ่งยากในการปฏิบัติและอาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย การผสมข้ามพันธุ์จะให้ผลไม่ค่อยแน่นอน และการผลิตปลานิลเพศผู้ GMT เป็นการผลิตปลานิลด้วยวิธีการด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงโครโมโซมเพศในพ่อพันธุ์ปลานิลเป็น “YY” หรือที่เรียกว่าซูเปอร์เมล (supermale) และเมื่อนำไปผสมกับแม่พันธุ์

ปกติจะได้ลูกปลาที่เป็นเพศผู้ทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า “Genetically Male Tilapia หรือ GMT” ซึ่งเป็นวิธีที่มีความยุ่งยากต้องอาศัยเทคโนโลยีค่อนข้างสูง ดังนั้นการแปลงเพศโดยใช้ฮอร์โมนจึงเป็นวิธีการที่ค่อนข้างสะดวก ระบบการจัดการพ่อแม่พันธุ์ไม่ยุ่งยาก ไม่จำเป็นต้องใช้สายพันธุ์เฉพาะ โดยนำสายพันธุ์ที่เลี้ยงง่ายโตเร็วมาแปลงเพศได้ นอกจากนี้ยังให้ประสิทธิภาพการแปลงเพศอยู่ในระดับสูงเป็นที่น่าพอใจ และที่สำคัญเทคโนโลยีในการแปลงเพศไม่ซับซ้อนจนเกินไป เกษตรกรสามารถศึกษาวิธีการแล้วนำไปปฏิบัติเองได้ (อุดม เรืองนพคุณ, 2548)

การแปลงเพศ หมายถึง การเปลี่ยนหน้าที่ของเพศจากเพศผู้หรือเพศเมียให้เป็นเพศหนึ่งเพศใดตามที่ต้องการ สำหรับปลานิลนิยมเปลี่ยนให้เป็นปลาเพศผู้ล้วน การแปลงเพศโดยใช้ฮอร์โมนเป็นการผลิตปลานิลเพศผู้ทั้งหมดโดยใช้ฮอร์โมนเพศผู้หรือแอนโดรเจน (androgen) ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การฝังแคปซูล การแช่ปลาในสารละลายฮอร์โมน และการผสมฮอร์โมนในอาหารให้ลูกปลาวัยอ่อนกินระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งจะสามารถนำมาให้เกิดการเปลี่ยนเพศในปลาเพศเมียได้ โดยไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อปลาเพศผู้ในรุ่นเดียวกัน ซึ่งสามารถเปลี่ยนเพศได้มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ (อุดม เรืองนพคุณ, 2548)

การแปลงเพศปลานิลโดยใช้ฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยผสมฮอร์โมนลงในอาหารให้ปลากิน ทำได้โดยนำไข่ปลานิลที่ออกจากปากแม่ปลามาเพาะฟักในกรวยฟักไข่ จนฟักออกมาเป็นตัว ซึ่งระยะนี้ระบบสืบพันธุ์ของลูกปลายังไม่พัฒนาเป็นเพศผู้หรือเพศเมียจนกระทั่งเมื่อถุงไข่แดงยุบจนถึงอายุประมาณ 3-4 วัน ลูกปลาจะว่ายน้ำออกจากกรวยมาสู่ถาดอนุบาล มาถึงระยะนี้ระบบสืบพันธุ์ของลูกปลาเริ่มพัฒนาเป็นช่วงที่จะเริ่มให้กินอาหารผสมฮอร์โมน การแปลงเพศปลานิลจากเพศเมียเป็นเพศผู้หรือทำให้เป็นหมันโดยใช้ฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ในอัตรา 60 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับการแปลงเพศปลานิลที่เลี้ยงในกระชังในบ่อที่มีอาหารธรรมชาติสูง และใช้อัตราความเข้มข้นของฮอร์โมนผสมอาหาร 40 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สำหรับบ่อที่ไม่มีอาหารธรรมชาติหรือมีปริมาณอาหารธรรมชาติค่อนข้างต่ำ นำลูกปลานิลที่มีอายุประมาณ 4 วันลงอนุบาลในกระชัง ให้อาหารผสมฮอร์โมนวันละ 5 ครั้ง โดยใช้เวลาในการให้อาหารผสมฮอร์โมนเพื่อแปลงเพศประมาณ 21 วัน นำลูกปลานิลที่แปลงเพศเสร็จเรียบร้อยแล้วไปอนุบาลต่อในกระชัง (อุดม เรืองนพคุณ, 2548)

## 2.4 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Processes)

กระบวนการออกซิเดชัน หรือ กระบวนการ (Oxidation Processes) เป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้กำจัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ หลักการของกระบวนการออกซิเดชัน คือ การใช้การออกซิเดชันด้วยอนุมูลอิสระ เพื่อทำหน้าที่ย่อยสลายหรือเปลี่ยนรูปของสารมลพิษ เกิดเป็นอนุมูลของอิสระ ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารมลพิษโมเลกุลอื่นได้ต่อไป ทำให้สารมลพิษเปลี่ยนโครงสร้างและมีขนาดเล็กลง และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (อาทิตย์พันธุ์ สัยยะนิฐิ, 2547)

ตัวอย่างการใช้กระบวนการออกซิเดชันในงานต่างๆมีดังนี้ต่อไปนี้เป็น (อาทิตย์พันธุ์ สัยยะนิฐิ, 2547)

1. ใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำใต้ดิน
2. ใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment) ก่อนน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ
3. ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่มีสารพิษที่ขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์เช่น ไซยาไนด์และสารประกอบของโลหะหนัก เป็นต้น
4. ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำขั้นสุดท้าย (Post-treatment) หลังจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษที่ยังหลงเหลืออยู่
5. ใช้ร่วมกับระบบบำบัดอื่นๆ

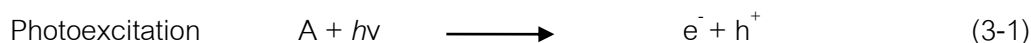
ข้อดีของกระบวนการออกซิเดชันเมื่อเทียบกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพคือ ไม่ต้องกำจัดสลัดจ์เนื่องจากในกระบวนการออกซิเดชันไม่เกิดสลัดจ์ และเป็นกรกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ออกจากสิ่งแวดล้อมไม่ได้เป็นการเคลื่อนสารมลพิษออกจากเฟสน้ำ (Aqueous Phase) เหมือนกับกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) หรือการแยกด้วยอากาศ (Air Stripping) กล่าวคือสารมลพิษในน้ำเสียถูกออกซิไดซ์ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่กระบวนการออกซิเดชันจะมีข้อเสียที่สำคัญ คือค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบค่อนข้างสูง (Klavarioti และคณะ, 2009)

กระบวนการออกซิเดชันที่ใช้กันทั่วไป เช่น โอโซน แสงยูวี เป็นต้น ซึ่งจะสามารถเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ซึ่งเป็นสารที่มีศักยภาพออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก กระบวนการออกซิเดชันที่มีการใช้งานในปัจจุบันมีหลายกระบวนการ เช่น การใช้แสงยูวี การใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) การใช้แสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ (UV/TiO<sub>2</sub>) การใช้แสงยูวีร่วมกับโอโซน (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) หรือใช้ร่วมกัน เช่น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ O<sub>3</sub>/ UV (Klavarioti และคณะ, 2009) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการใช้แสงยูวีซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

#### 2.4.1 กระบวนการโฟโตไลซิส

กระบวนการโฟโตไลซิสเป็นการให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่นพอดีกับพันธะของสาร เพื่อให้เกิดการดูดกลืนคลื่นแสงของสาร สารใด ๆ ที่สภาวะปกติจะอยู่ในสภาวะที่มีพลังงานต่ำสุด เรียกว่าสภาวะพื้น (Ground State) เมื่อได้รับช่วงความยาวคลื่นที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมแล้ว จะเข้าสู่สภาวะใหม่ซึ่งจะมีพลังงานสูงขึ้น เป็นสภาวะที่สารถูกกระตุ้น เรียกว่าสภาวะเร้า (Excited State) เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา โดยเมื่อสารได้รับพลังงานที่มากเกินไปพอ สารจะเกิดการแตกตัวและเกิดปฏิกิริยาต่อไป

กระบวนการโฟโตไลซิส เป็นการออกซิเดชันทางเคมีที่ใช้แสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หลักการพื้นฐานสามารถอธิบายได้ดังนี้ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนคลื่นแสง ซึ่งพลังงานที่ถูกดูดกลืนเข้าไปจะทำให้โมเลกุลอยู่ในสภาวะเร้า จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ สารนั้นจะดูดกลืนแสงเฉพาะบางช่วงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน จนทำให้เกิดโพรงอิเล็กตรอน (hole: h<sup>+</sup>) เมื่อมีการดูดกลืนแสงจะมีปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้ (Parsons, 2004)

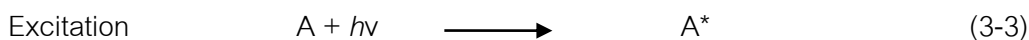


คู่อิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) และโพรงอิเล็กตรอน (h<sup>+</sup>) หลังจากถูกกระตุ้นด้วยแสงแล้ว อาจกลับมารวมตัวกันใหม่ได้อย่างรวดเร็วจึงมีผลทำให้เกิดความร้อนขึ้น หรือทั้งสองอาจจับอยู่ที่ผิวของสาร ซึ่ง

เป็นที่ที่อิเล็กตรอนและโฟรงอิเล็กตรอนทำปฏิกิริยากับสิ่งอื่นๆ ที่ดูดซับหรืออยู่ใกล้ผิวของสารได้ แสดงดังสมการที่ (3-1)-(3-2)

สำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสงของโมเลกุลสารอินทรีย์ มีกลไกทางเคมี 2 กลไก คือ เมื่อสารได้รับแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของอิเล็กตรอนอาจทำให้เกิดกลไกทางเคมีคือ 1) การออกซิเดชันโดยตรงกับโฟรงอิเล็กตรอน และ 2) การเกิดกระบวนการออกซิเดชันกับโมเลกุลของน้ำ ซึ่งโดยปกติการออกซิไดซ์โดยอนุมูลอิสระมีแนวโน้มเป็นกลไกหลักในกระบวนการออกซิเดชันด้วยแสง (Parsons, 2004)

1. การออกซิเดชันโดยตรงกับโฟรงอิเล็กตรอน แสงจะทำปฏิกิริยากับโฟรงอิเล็กตรอนของโมเลกุลสารอินทรีย์ และจะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาทันทีเมื่อโมเลกุลดูดกลืนแสง คือเมื่อมีการดูดกลืนคลื่นแสงหนึ่งของพลังงานแสง จะทำให้โมเลกุลอยู่ในสภาวะที่ไม่สมดุลกับสิ่งแวดล้อม และจะสูญเสียพลังงานรูปใดรูปหนึ่งออกมา แสดงดังสมการที่ (3-3)



2. การออกซิเดชัน แสงจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ ได้เป็นอนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระเหล่านี้จะเกิดการออกซิเดชันกับสารต่อไป ซึ่งอนุมูลอิสระจะมีศักยภาพในการออกซิไดซ์สูง อนุมูลอิสระเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วและไม่มีความเฉพาะเจาะจง ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์ โดยจะเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ (De Lasa และคณะ, 1992)

สมการที่เกี่ยวข้องกับการออกซิไดซ์ด้วยอนุมูลอิสระแสดงดังสมการที่ (3-4) – (3-6)



## 2.5 อนุมูลอิสระ (Free radical)

### 2.5.1 ความหมายของอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไม่เป็นคู่ อยู่ในวงอิเล็กตรอนวงนอกสุด (Out Orbital) เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่โดดเดี่ยว (Unpaired Electron) อยู่ในวงโคจรของโมเลกุล ทำให้ไม่เสถียร ทำให้อนุมูลอิสระเป็นสารที่มีความไวในการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นสูงมาก โดยอนุมูลอิสระจะไปแย่งจับหรือดึงอิเล็กตรอนจากโมเลกุลหรืออะตอมสารที่อยู่ข้างเคียง เพื่อให้ตัวมันเสถียร โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงที่สูญเสียหรือรับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นอนุมูลอิสระชนิดใหม่ ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่จะทำปฏิกิริยากับสารโมเลกุลอื่นต่อไป เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) ต่อกันเรื่อยๆ (Halliwell, 2009)

### 2.5.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนจากวงโคจรให้กับโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เรียกสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing Agent) และเรียกสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนี้ว่า ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน นอกจากนี้ ออกซิเดชันยังหมายถึงการเสียไฮโดรเจน อะตอมออกจากโมเลกุลอีกด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชันและอนุมูลอิสระนั้นมีความเกี่ยวข้องกัน เนื่องจากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของสารต่างๆ และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอื่นๆ เป็นปฏิกิริยาต่อไป (Garces, 2006)

### 2.5.3 ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระจะเกิดปฏิกิริยาที่เป็นแบบปฏิกิริยาลูกโซ่ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นขั้นที่อนุมูลอิสระถูกสร้างขึ้น เรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนอินิทิเอชัน (Initiation Step) ขั้นที่สองเป็นขั้นที่อนุมูลอิสระถูกเปลี่ยนไปเป็นอนุมูลอิสระตัวอื่นต่อไป เรียกขั้นนี้ว่าขั้นพรอพาเกชัน (Propagation Step) และขั้นสุดท้าย เรียกว่า ขั้นเทอร์มิเนชัน (Termination Stop) เป็นขั้นหยุด

ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระเป็นขั้นตอนที่มีการรวมกันของอนุมูลอิสระ 2 อนุมูล ได้เป็นสารที่มีความเสถียร (Hudson, 1990)

กระบวนการโฟโตไลซิสจัดเป็นปฏิกิริยาขั้นอินินิทีเอชัน ซึ่งในขั้นนี้อนุมูลอิสระเกิดมาจากกลไกต่างๆกันหลายวิธี คือ การแตกพันธะของโมเลกุล (Homolysis) การแตกพันธะของสารเนื่องจากแสง (Photolysis) ผลของรังสี (Radiolysis) และ ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) ซึ่งปฏิกิริยาทั้ง 4 จัดเป็นกลไกพื้นฐานในการสร้างอนุมูลอิสระจากสารอินทรีย์ (Roberfroid and Calderon, 1995)

กระบวนการโฟโตไลซิสเป็นการแตกพันธะของโมเลกุลจากการดูดกลืนพลังงาน เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ที่พบมากคือ อนุมูลไฮดรอกซิล โดยสารจะดูดกลืนพลังงานแสงช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม หลังดูดกลืนแสงสารจะเข้าสู่สภาวะเร้า โดยเมื่อสารได้รับพลังงานที่มากเกินไป สารจะเกิดการแตกตัวและเกิดปฏิกิริยาต่อไป (Hudson, 1990)

## 2.6 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีคุณสมบัติไม่แตกตัว รังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถแบ่งได้เป็น UV-A, UV-B และ UV-C (อาทิติย์พันธุ์ สัยยะนิฐี, 2547) มีความยาวคลื่นของรังสีดังแสดงในตารางที่ 2.2



## ตารางที่ 2.2 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
Ultraviolet	100 - 400
UV-A	320 - 400
UV-B	280 - 320
UV-C	100 - 280
Visible Radiation (light)	400 - 760
Infrared Radiation (IR)	760 - $10^6$ (1 มิลลิเมตร)

ที่มา: (WHO, 1979 อ้างถึงใน อาทิตยพันธุ์ สัยยะนัฐ, 2547)

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสั่นของสนามไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดพลังงานที่ส่งผ่านให้เกิดรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น คลื่นวิทยุ คลื่นแสง และรังสีเอ็กซ์เรย์ เป็นต้น แสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดสามารถจำแนกประเภทได้โดยความแตกต่างของความถี่ และความยาวคลื่น ส่วนรังสีไม่แตกตัว (Non-Ionizing Radiation, NIR) เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 100 นาโนเมตร เป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถแตกพันธะอ่อนของโมเลกุลใหญ่ได้ (อาทิตยพันธุ์ สัยยะนัฐ, 2547)

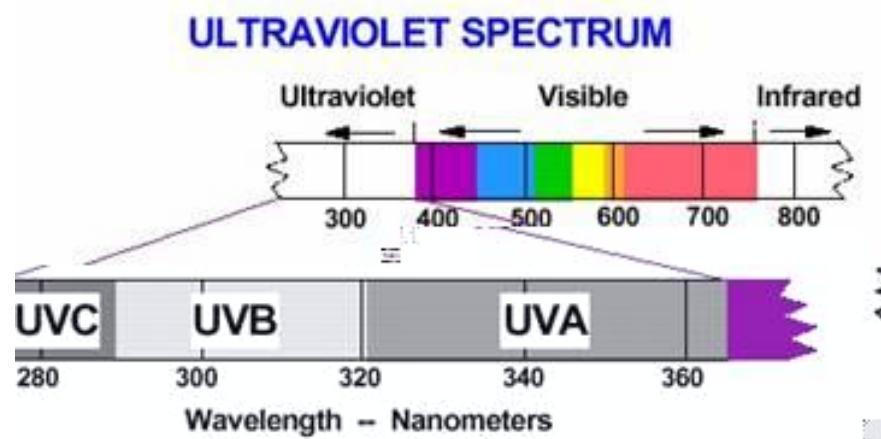
### 2.6.1 แหล่งกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

แหล่งกำเนิดของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งได้หลายประเภท ตัวอย่างเช่น แบ่งตามชนิดของวัสดุหรืออุปกรณ์ที่ทำให้เกิดรังสีในระดับ submicroscopic แหล่งกำเนิดรังสี อธิบายได้ในรูปของพลังงานนิวเคลียร์ พลังงานไฟฟ้า หรือการส่งผ่านระหว่างโมเลกุล หรือโดยการเร่งพลังงานของอนุภาค แต่โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเป็นการส่งผ่านพลังงานระหว่างชั้นของโมเลกุล

## 1. การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดที่สามารถปล่อยรังสีออกมาได้หลายช่วงความยาวคลื่น คือ รังสีอัลตราไวโอเล็ต และคลื่นแสงอื่นๆ (Visible Radiation) เมื่อรังสีต่างๆเหล่านี้เดินทางมายังผิวโลกจะถูกดูดซับไว้ในชั้นบรรยากาศ สำหรับรังสีช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 320 นาโนเมตร เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศ ความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการดูดซับของโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ ทำให้ไม่มีรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 320 นาโนเมตร ตกลงมาสู่พื้นโลก การเดินทางของรังสีอัลตราไวโอเล็ตมายังพื้นโลกนั้นไม่ได้เดินทางเป็นคลื่นโดยตรง แต่จะเดินทางโดยการแผ่รังสี เนื่องจากมีการสกัดกั้นโดยชั้นบรรยากาศ โดยสภาวะที่ท้องฟ้ามีเมฆหรือหมอกมากก็จะเกิดการสกัดกั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้ได้มากเช่นกัน (อาทิตย์พันธุ์ สัยยะนิฐี, 2547)

คลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100 – 400 นาโนเมตร แสดงดังในภาพที่ 2.3 โดยสามารถแบ่งชนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้เป็น 3 ชนิดตามช่วงความยาวคลื่น (Shie, 2007)



ภาพที่ 2.3 ช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต

ที่มา: (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2554 )

1.1 ช่วงความยาวคลื่น หรือ UV-A อยู่ในช่วง 320 – 400 นาโนเมตร มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Long Wave Ultraviolet Radiation หรือ Near Ultraviolet Radiation หรือ Black Light รังสีช่วงนี้ไม่ทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงผิวโลกเนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ซึ่งห่อหุ้มโลกอยู่สามารถดูดกลืนได้น้อยมาก

1.2 ช่วงคลื่นปานกลาง หรือ UV-B อยู่ในช่วงคลื่น 280 – 320 นาโนเมตร มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Middle Ultraviolet Radiation หรือ Sunburn Radiation รังสีช่วงนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตหลายประเภท และยังสามารถพบได้ในแสงแดดที่ส่องผ่านลงมาถึงผิวโลก เนื่องจากก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศสามารถดูดกลืนไว้ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

1.3 ช่วงคลื่นสั้น หรือ UV-C อยู่ในช่วง 100 – 280 นาโนเมตร เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Short Wave Ultraviolet Radiation หรือ Germicidal Radiation รังสีช่วงนี้เป็นอันตรายอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต แต่ตามปกติจะไม่พบในแสงแดดที่ส่องผ่านมาถึงโลกก็จะถูกก๊าซโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ดูดกลืนไว้ทั้งหมดช่วงคลื่นที่เรียกว่า Vacuum UV ความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร รังสีในช่วงนี้ยังมีการศึกษาไม่มากนักเนื่องจากเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

## 2. แหล่งกำเนิดที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial sources)

วัตถุทุกชนิดที่ถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่า 2500 เคลวิน จะสามารถปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ โดยสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ผ่านกระแสไฟฟ้าแรงดัน และสภาวะของกระแสที่ปล่อยออกมา โดยทั่วไปรังสีที่ปล่อยออกมาจะแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน ความดัน กลไกในอุปกรณ์ รูปร่างของหลอด ระบบการสะท้อนแสง และอิเล็กทรอนิกส์ โดยสามารถแบ่งตามชนิดของแหล่งกำเนิดแสง (Fluorescent Lamp) ที่สำคัญได้ดังนี้ (กมลวรรณ ปรีชาวนา, 2547)

2.1 Low Pressure Mercury Arcs หลอดชนิดนี้ปล่อยรังสีอัลตราไวโอเล็ตออกมาในช่วงแคบ พลังงานที่ปล่อยออกมาส่วนใหญ่มีความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่ใช้ในกระบวนการฆ่าเชื้อโรค ดังนั้นจึงมีการนำมาใช้ประโยชน์กันมากในการควบคุมจุลินทรีย์

2.2 High Pressure Mercury Arcs หลอดชนิดนี้ต้องใช้งานที่ความดัน 200 - 1000 KPa และใช้ควอตซ์เป็นตัวหลอด รังสีที่ออกมาจะมีความเข้มสูงกว่าชนิดแรก สามารถปล่อยรังสีในช่วงความยาวคลื่น 254, 279, 303, 313 และ 365 นาโนเมตร หลอดชนิดนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการพิมพ์ และ Photochemical Reactor

2.3 High Pressure Xenon Arcs หลอดชนิดนี้ต้องใช้งานภายใต้ความดันสูงมากและข้อดีของหลอดชนิดนี้คือ จะให้สเปกตรัมที่ออกมาเหมือนกับที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ และสามารถปล่อยพลังงานได้อย่างสม่ำเสมอ แม้จะใช้เป็นเวลานาน และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายประเภท

การตรวจวัดรังสีอัลตราไวโอเล็ตแตกต่างกับคลื่นแสงเพราะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่จำเพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นฐานทางฟิสิกส์หรือพื้นฐานทางเคมีหรือปฏิกิริยาทางชีววิทยา เครื่องมือวัดทางฟิสิกส์นั้นจะทำการวัดรังสีที่ปล่อยออกมาทันที แต่เครื่องมือวัดทางเคมีและชีววิทยาจะวัด โดยการคำนวณจากการสัมผัสรังสีหน่วยของการวัดรังสีที่ใช้ ดังแสดง ในตารางที่ 2.3

### ตารางที่ 2.3 หน่วยของการวัดรังสี

Term	SI Unit	International Symbol	Definition
Wavelength	nm, $\mu\text{m}$		
Radiant energy	J	Qe	
Radiant Flux	W	$\phi$ , Pe	DQe/dt
Radiant Intensity	W/sr	Ie	dPe/d $\Omega$
Irradiance	W/m <sup>2</sup>	Ee	dPe/dA
Radiant Exposure	J/m <sup>2</sup>	He	Ee x t

ที่มา: (WHO, 1979 อ้างถึงใน กมลวรรณ ปรีชาวนา, 2547)

#### 2.6.2 หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

หลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด (ปรีศนี เจริญสิน, 2549) คือ

1. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันสูง (High – Pressure Lamp) โดยหลอดความดันสูงนี้ภายในบรรจุด้วยก๊าซอาร์กอน หรือไอปรอท และขั้วหลอดแบบ Epoxidated Electrodes (Wolfram Wires Coated with Strontium and Barium Carbonates) ตัวหลอดทำจากวัสดุท่อควอทซ์ (Quartz Pipe) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 – 30 มิลลิเมตร และมีขั้วหลอดปิดอยู่ปลายทั้งสอง หลอดควอทซ์ซึ่งบรรจุปรอทที่ความดันสูง (ประมาณ 1 – 10 atm) เมื่อทำงานจะมีความร้อนเกิดขึ้นถึง 300 องศาเซลเซียส โดยหลอดชนิดนี้จะกำเนิดแสงขาว (Visible Light) รังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 365.0 – 366.3 นาโนเมตร

2. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันปานกลาง (Medium – Pressure Lamp) จะบรรจุไอปรอทอยู่ภายใน มีความดันก๊าซทั้งหมดอยู่ในช่วง 10 – 30 MPa (100-300 atm)

3. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิดความดันต่ำ (Low – pressure lamp) หลอดชนิดนี้สร้างขึ้นจากท่อแก้ว Uviol รังสีที่เกิดขึ้นมาจากไอปรอทซึ่งบรรจุอยู่ในหลอดแก้ว มีความดันประมาณ 0.001 atm โดยปกติหลอดชนิดนี้จะมีขนาด 15 – 60 วัตต์ ความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำงานมีค่าประมาณร้อยละ 70 ของรังสีที่เกิดขึ้นจะมีความยาวคลื่นเท่ากับ 253.7 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรค และทำลายพันธะเคมีต่างๆ

## 2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 ฮอร์โมน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ปวีตรา โชติสุกานต์ (2551) ศึกษาการดูดซับสารเมทิลเทสโทสเตอโรนโดยตะกอนดินชนิดต่างๆ โดยทำการศึกษาการดูดซับเมทิลเทสโทสเตอโรนบนดินห้ำาชนิดและดินตะกอนหนึ่งชนิด ที่มีปริมาณสารอินทรีย์แตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาถึง ผลของพีเอช และความเค็มของน้ำ ที่มีต่อการดูดซับเมทิลเทสโทสเตอโรนบนดินและดินตะกอน พบว่าการดูดซับเมทิลเทสโทสเตอโรนบนดินทั้งห้ำาชนิดมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณสารอินทรีย์ในดิน โดยการดูดซับบนทรายมีค่าน้อยกว่าดินลูกรังเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อการดูดซับของเมทิลเทสโทสเตอโรนเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าพีเอชและค่าความเค็มไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาการดูดซับสารเมทิลเทสโทสเตอโรนบนดินทรายและดินลูกรัง แต่มีผลกระทบโดยตรงต่อการดูดซับบนดินตะกอน เมื่อค่าพีเอชลดลงและค่าความเค็มเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซับของดินตะกอนจะเพิ่มขึ้น

Homklin และคณะ (2010) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ในตะกอนดินภายใต้สภาวะที่มีตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ที่แตกต่างกัน เป็นการจำลองสภาวะต่างๆ ตามธรรมชาติของแหล่งน้ำ 5 สภาวะ ตามตัวรับอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ สภาวะที่มีอากาศ สภาวะที่มีไนเตรตสภาวะที่มีเหล็ก สภาวะที่มีซัลเฟต สภาวะไม่มีอากาศ ในแต่ละสภาวะจะมีระยะเวลาในการบ่มที่แตกต่างกันออกไป ทุกๆสภาวะจะประกอบด้วยการทดลอง 6 ชุด เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพในกรณีที่มี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน และไม่มี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยใช้ความเข้มข้นของฮอร์โมน 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่มีอากาศ และสภาวะที่มีซัลเฟต โดยสามารถจำกัด 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน และการทำงานของ

ฮอร์โมนได้หมดจึงไม่เหลือฮอร์โมนตกค้างในสิ่งแวดล้อม ภายใต้สภาวะไม่มีอากาศ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ แต่ไม่สามารถกำจัดการทำงานของฮอร์โมนได้ ภายใต้สภาวะที่มีเหล็ก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพอย่างช้าๆ และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพในสภาวะที่มีไนเตรต ทำให้ในสภาวะที่มีไนเตรต สภาวะที่มีเหล็ก และสภาวะไม่มีอากาศ ยังเหลือฮอร์โมนตกค้างในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ในปีเดียวกันยังทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการคัดแยกแบคทีเรียที่ย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจากตะกอนดินและน้ำในบ่อแปลงเพศปลานิล รวมทั้งประเมินค่าการทำงานของฮอร์โมนที่เกิดจาก 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนและผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน พบว่าการย่อยสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนภายใต้สภาวะที่มีอากาศ สภาวะที่มีซัลเฟต และสภาวะไม่มีอากาศ มีอัตราเร็วในการย่อยสลายเป็นแบบปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง จากการคัดแยกเชื้อที่สามารถย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจากตะกอนดิน และน้ำในบ่อแปลงเพศปลานิลพบว่า มีเชื้อจำนวน 30 สายพันธุ์ที่สามารถย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ จากเชื้อที่คัดแยกมาทั้งหมดสามารถแบ่งได้เป็น 3 จีนัส คือ *Pimelobacter*, *Rhodococcus* และ *Nocardioidea* โดยเชื้อ SB100-05, SB010-03 และ WB100-05 ถูกเลือกเป็นตัวแทนของเชื้อทั้ง 3 กลุ่ม จากการวิเคราะห์ทางจุลณพศาสตร์ด้วย Haldane's model พบว่า 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน มีผลกระทบต่อการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียจากแบคทีเรียทั้ง 3 สายพันธุ์ดังกล่าว พบว่า SB100-05 สามารถย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ได้เร็วกว่าสายพันธุ์อื่นแต่ทนต่อ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้น้อยกว่าแบคทีเรียสายพันธุ์อื่น

### 2.7.2 อิทธิพลของแสงต่อฮอร์โมน

Coleman และคณะ (2004) ศึกษาการกำจัดฮอร์โมนเอสโตรเจนสังเคราะห์ ด้วยกระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการโฟโตคะตะไลซิส กระบวนการโฟโตไลซิสทำการศึกษาโดยใช้หลอด UV-A ที่ช่วงความยาวคลื่น 320 – 400 นาโนเมตร กำลังวัตต์ 125 วัตต์ สำหรับกระบวนการโฟโตคะตะไลซิสทำการศึกษาโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของฮอร์โมนโดยใช้ยีสต์ (recombinant yeast assay) ฮอร์โมนที่ใช้ศึกษา คือ 17 เบต้า-เอสตราไดออล ( $17\beta$ -estradiol) 17แอลฟา- เอสทีนิวเอสตราไดออล

(17 $\alpha$ -ethinylestradiol) และเอสโตรน (estrone) ที่ความเข้มข้นฮอร์โมน 10 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่า กระบวนการโฟโตคะตะไลซิสเกิดเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดยสามารถกำจัดฮอร์โมนทั้ง 3 ชนิดได้เท่าๆกัน ซึ่งฮอร์โมนจะลดลงร้อยละ 50 ในเวลา 10 นาที สำหรับผลของกระบวนการโฟโตไลซิส สามารถกำจัดฮอร์โมน 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออลได้มากที่สุด รองลงมาคือ เอสโตรน และ 17 เบต้า-เอสตราไดออล โดยสามารถกำจัดได้ 0.42 0.2 และ 0.1 เท่าของ กระบวนการโฟโตคะตะไลซิส ตามลำดับ

Zuo และคณะ (2006) ศึกษาสถานการณ์และการสลายตัวด้วยแสงของ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออล (17 $\alpha$ -ethinylestradiol) จากแม่น้ำในสหรัฐอเมริกา พบว่าในแม่น้ำมีความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออล 4.7 นาโนกรัมต่อลิตร ส่งผลกระทบต่อกุ้งและปลาบริเวณชายฝั่งทะเลที่แม่น้ำสายนี้ไหลลง นอกจากนี้ตรวจพบ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออลแล้ว ยังมีการตรวจพบ เอสโตรน (estrone) และ 17 เบต้า-เอสตราไดออล (17 $\beta$ -estradiol) บริเวณปากแม่น้ำอีกด้วย โดยเอสโตรนมีความเข้มข้น 1.2 นาโนกรัมต่อลิตร และ 17 เบต้า-เอสตราไดออลมีความเข้มข้น 0.83 นาโนกรัมต่อลิตร เมื่อเวลาผ่านไปทำการวัดความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออลด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารและองค์ประกอบของสาร (Gas chromatography - mass spectroscopy: GC-MS) พบว่าความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออล ในฤดูร้อนลดลงมากกว่าในฤดูหนาว จึงทำการศึกษาโดยฉายแสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร กำลังวัตต์ 25 วัตต์ ในน้ำตัวอย่างที่เก็บจากแม่น้ำ พบว่าความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออลลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าครึ่งชีวิตของ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออล คือ 1.5 วัน

Zhang และคณะ (2007) ศึกษากระบวนการใช้แสงในการสลาย เอสโตรน (estrone) และ 17 เบต้า-เอสตราไดออล (17 $\beta$ -estradiol) ในน้ำ ศึกษาโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาโดยใช้หลอดยูวีที่ช่วงความยาวคลื่น 238-579 นาโนเมตร กำลังวัตต์ 150 วัตต์ และการทดลองที่ 2 ศึกษาโดยใช้หลอดยูวีที่ช่วงความยาวคลื่น 253 นาโนเมตร กำลังวัตต์ 15 วัตต์ ทำการวัดความเข้มข้นของเอสโตรน และ 17 เบต้า-เอสตราไดออล ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารและองค์ประกอบของสาร (Gas chromatography - mass spectroscopy: GC-MS) และเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid phase extraction (SPE) จากการศึกษาพบว่าการทดลองที่ 2 สามารถสลายฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดได้ร้อยละ 98 ในเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนการทดลองที่ 1 สลาย



ฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดได้ร้อยละ 97 ใช้เวลา 4 ชั่วโมง เมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัว พบว่าทั้งสองการทดลองเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดยมีค่าครึ่งชีวิตของฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิด ดังนี้ การทดลองที่ 1 คือ 0.8 ชั่วโมง และการทดลองที่ 2 คือ 0.3 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าพีเอช กรดฮิวมิก ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราการสลายตัวด้วยแสงของฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดจะขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของฮอร์โมน ฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดสามารถสลายได้ดีที่พีเอชช่วง 2 ถึง 7.6 และสามารถสลายได้ดีที่สุดในช่วงพีเอช 7.6 ถ้าพีเอชมากกว่านี้อัตราการสลายตัวของฮอร์โมนจะลดลง จากการศึกษาค้นคว้าการกรวดฮิวมิกมีผลต่ออัตราการสลายตัวของฮอร์โมน และเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะมีอัตราการสลายตัวของฮอร์โมนมากขึ้นด้วย เมื่อมีการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยา คือไทเทเนียมไดออกไซด์ลงไป พบว่าความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นมากกว่า 2 กรัมต่อลิตร ทำให้อัตราการสลายตัวของฮอร์โมนเพิ่มมากขึ้น

Grylik และคณะ (2010) ศึกษาค่าจลนพลศาสตร์จากการใช้แสงในการสลายสเตอรอยด์ฮอร์โมนเพศ โดยใช้แสง UV-C ที่ช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และศึกษาการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ รวมทั้งยังศึกษาผลของพีเอช โดยศึกษาที่พีเอช 5 7 และ 10 พบว่าการใช้แสง UVC ที่ช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สามารถสลายโบลดีโนน (boldenone) ได้อย่างรวดเร็วโดยในเวลา 1 นาที สามารถสลายได้ร้อยละ 50 ส่วนเทรโนโบลอน (trenbolone) จะสลายได้อย่างช้าๆ ซึ่งต้องใช้เวลา 30 นาที จึงจะสามารถสลายได้ร้อยละ 50 แต่จะเกิดการสลายอย่างรวดเร็วเมื่อมีการใช้แสงร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยมีค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของโบลดีโนน และ เทรโนโบลอน คือ 0.61 และ 0.0029 ตามลำดับ และพบว่าค่าพีเอชไม่มีผลต่อการใช้แสงในการสลายฮอร์โมน

Vulliet และคณะ (2010) ศึกษาถึงอิทธิพลของแสงต่อการสลายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนในน้ำ เพื่อศึกษาการสลายของฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน และจำแนกผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปของฮอร์โมน เมื่อมีการฉายแสง ภายใต้สภาวะฟอสเฟตบัพเฟอร์และในน้ำธรรมชาติ ที่ช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่น 313 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้นฮอร์โมน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังศึกษาผลของพีเอชต่อการสลายฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดยศึกษาที่พีเอช ระหว่าง 4 ถึง 8 พบว่า จะเกิดการสลายของฮอร์โมนเทสโทสเตอโรนในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร มากกว่าที่ช่วงความยาวคลื่น 313 นาโนเมตร

โดยที่ช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สามารถสลายฮอริโมนเทสโทสเตอโรนได้ร้อยละ 90 ในเวลา 9 นาที สำหรับที่ช่วงความยาวคลื่น 313 นาโนเมตรต้องใช้เวลา 11 ชั่วโมงจึงจะสามารถสลายฮอริโมนเทสโทสเตอโรนได้ร้อยละ 90 และเมื่อคำนวณกลับไปในสภาวะแสงในธรรมชาติจะเกิดการสลายตัวของฮอริโมนเทสโทสเตอโรนได้ช้า และพบว่า พีเอช ไม่ส่งผลต่อการใช้แสงในการสลายฮอริโมนเทสโทสเตอโรน หลังการฉายแสงจะเกิดผลิตภัณฑ์ออกมาหลายตัว แต่ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นจะสลายตัวด้วยแสงได้ช้ากว่าฮอริโมนเทสโทสเตอโรน

### 2.7.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation Processes)

Huber และคณะ (2003) ศึกษากระบวนการออกซิเดชันของยาโดยการใช้อิโชนและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของอิโชนและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง และศึกษาหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่สองของอิโชน และอนุมูลไฮดรอกซิลในการออกซิเดชันยา ทำการทดลองแบบที่ละเท ควบคุมการทดลองที่ พีเอช 7 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสในสารละลายบริสุทธิ์ พบว่า ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่สองในกระบวนการใช้อิโชนที่ทำให้ยาเหล่านี้ เกิดการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ต้องมีค่ามากกว่า  $5 \times 10^4$  โมลต่อวินาที และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่สองของอนุมูลไฮดรอกซิลคือ 3.3 ถึง  $9.8 \times 10^9$  จากการศึกษายังพบว่า มีสารพิษขนาดเล็กที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วย และยังทำการศึกษเกี่ยวกับ จลนพลศาสตร์ (Kinetics) การออกซิเดชันของยาในแหล่งน้ำธรรมชาติ จากการศึกษาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำนายลักษณะการละลายยาในน้ำธรรมชาติ

Huber และคณะ (2004) ศึกษาการทำงานของฮอริโมนและการก่อรูปของกระบวนการออกซิเดชันโดยใช้อิโชนสำหรับ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออลโดยใช้ยีสต์เป็นตัวทดสอบการทำงานของฮอริโมน และตรวจวัดการก่อรูปของฮอริโมนด้วยเครื่อง LC-MS/MS และ GS/MS โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ศึกษาโดยใช้ 17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราไดออล (EE2) 17 เบต้า-เอสตราไดออล (E2) และสเตียรอยด์ (E1) พบว่า อิโชนที่มีความเข้มข้นต่ำไม่สามารถออกซิไดซ์ฮอริโมนได้ ต้องใช้ความเข้มข้นอิโชนที่มีความเข้มข้นสูงจึงสามารถออกซิไดซ์การทำงานของฮอริโมนได้บางส่วน ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาลำดับที่สองการใช้อิโชนคือ  $3 \times 10^6$  โมลโมเลกุลต่อวินาที และค่าครึ่งชีวิตคือ 3 นาที การออกซิเดชันของฮอริโมนจะแตกต่างกันไปตาม

โครงสร้างทางเคมีของฮอริโมนแต่ละชนิด และยังพบว่าค่า พีเอชมีผลต่อการออกซิเดชันของฮอริโมน

Huber และคณะ (2005) ศึกษาการออกซิเดชันยาโดยใช้โอโซนสำหรับน้ำเสียชุมชน โดยทำการทดลองในโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ ในการศึกษาครั้งนี้ต้องหาปริมาณความเข้มข้นของโอโซนที่ใช้ในการออกซิเดชันที่น้อยที่สุด ศึกษาอิทธิพลของสารแขวนลอยในการออกซิเดชันยา และคำนวณความเป็นไปได้ในการออกซิเดชันยาจากสารประกอบในน้ำ ทำการทดลอง 3 ระบบ คือ แอททิเวเตดสลัดจ์ (activated sludge (CAS)) ปริมาณสารแขวนลอยไม่คงที่ แอททิเวเตดสลัดจ์ (activated sludge (CAS + SS)) ใช้ปริมาณสารแขวนลอย 15 มิลลิกรัม และใช้แผ่นเมมเบรนซีวภาพ (MBR) ใช้ปริมาณสารแขวนลอย 15 มิลลิกรัม ที่อัตราไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เวลาเก็บ 4.2 นาที ความเข้มข้นโอโซน 0.5-5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ความเข้มข้นโอโซนที่มากกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถออกซิเดชันยาได้ร้อยละ 90 ถึง 99 สารแขวนลอยไม่มีผลต่อการออกซิเดชันของยาโดยใช้โอโซน เมื่อคำนวณความเป็นไปได้ในการออกซิเดชันยาจากสารประกอบในน้ำ พบว่า ยาไม่เกิดการออกซิเดชันกับสารประกอบในน้ำและสารประกอบเหล่านี้ยังไปขัดขวางการออกซิเดชันของยาโดยใช้โอโซนอีกด้วย

Irmak และคณะ (2005) ศึกษาการสลาย 17 เบต้า-เอสตราไดออล และบิสฟีนอล เอ ในน้ำโดยใช้โอโซนและโอโซนร่วมกับยูวี ที่ความเข้มข้นโอโซนแตกต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพในการสลายสารทั้ง 2 ชนิดใกล้เคียงกัน โดยสามารถสลาย 17 เบต้า-เอสตราไดออล และบิสฟีนอล เอ ได้ทั้งหมด สำหรับ 17 เบต้า-เอสตราไดออลสามารถสลายได้อย่างรวดเร็ว ในการสลาย 17 เบต้า-เอสตราไดออล 1 โมล ใช้โอโซนจำนวน 18.9 โมล ก็สามารถสลายได้สมบูรณ์ สำหรับบิสฟีนอล เอ สามารถสลายได้อย่างช้าๆ โดยบิสฟีนอล เอ 1 โมล ต้องใช้โอโซนจำนวน 21.1 โมล จึงจะสลายได้ทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลาย 17 เบต้า-เอสตราไดออล ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง LC-MS และพบว่าเกิดการออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์โดยโอโซนจะเกิดการออกซิไดซ์โดยตรงกับอนุมูลไฮดรอกซิล

Kim และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการใช้แสงในการสลายยาระหว่างแสงยูวีและแสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการบำบัด ศึกษาโดยใช้ยาหลายชนิด เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดยาระหว่างการใช้แสงยูวีเพียงอย่างเดียวและการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าการใช้แสงยูวีในการบำบัดยาสามารถบำบัดยาได้ทุกชนิดต้องใช้

เวลานานถึง 245 นาที ยาจึงสลายได้มากกว่าร้อยละ 90 ด้วยมีความเข้มข้นแสงยูวีที่ระดับ 38 มิลลิ จูลต่อตารางเซนติเมตรถึง 5,644 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร ส่วนการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์ สามารถบำบัดยาทุกชนิดใช้เวลาเพียง 30 นาที ยาจึงสลายได้มากกว่าร้อยละ 90 ด้วยมีความเข้มข้นแสงยูวีที่ระดับ 691 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าการ ใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการบำบัดยาได้มากกว่าการใช้แสงยูวี เพียงอย่างเดียว

Klavarioti และคณะ (2009) ศึกษาวิธีการบำบัดยาที่ตกค้างในน้ำด้วยกระบวนการ ออกซิเดชันขั้นสูงแบบต่างๆดังนี้ ศึกษากระบวนการโฟโตไลซิสโดยใช้แสงธรรมชาติและแสง สังเคราะห์เพียงอย่างเดียว รวมทั้งการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ศึกษากระบวนการ ใช้โอโซน โดยใช้โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ มีการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดโดยใช้โอโซนร่วมกับ แสงยูวีและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ศึกษากระบวนการเฟนตัน โดยใช้เพอร์รัสและเพอร์ริกไอออน ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษากระบวนการโฟโตคะตะไล ซิส โดยใช้แสงเป็นตัวออกซิไดซ์ และใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษา กระบวนการออกซิเดชันโดยไฟฟ้าเคมี ทำการศึกษาโดยใช้ แกรไฟต์ แพลทินัม ไทเทเนียมได ออกไซด์ เป็นเซลล์ไฟฟ้าขั้วบวก และศึกษากระบวนการอัลตราซาวด์ โดยใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ในการบำบัด พบว่าปริมาณยาที่ตกค้างในน้ำลดลงหลังการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการออกซิเดชัน ขั้นสูงแบบต่างๆและยังศึกษาการนำกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการ บำบัดน้ำในระบบต่างๆ โดยการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงบำบัดน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ บำบัดน้ำเสียจริงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นและยังนำกระบวนการ ออกซิเดชันขั้นสูงมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตน้ำประปาชุมชนได้อีกด้วย

Wang และคณะ (2009) ศึกษาการสลายกรดฮาโลอะซิติกในน้ำโดยใช้แสงยูวี โอโซนและ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง โดยใช้โอโซนและแสงยูวีเป็นตัวออกซิไดซ์ และกระบวนการ ออกซิเดชันขั้นสูง โดยใช้ โอโซน/แสงยูวี, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์/แสงยูวี, โอโซน/ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์, โอโซน/แสงยูวี/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ศึกษาการสลายกรดฮาโลอะซิติก (haloacetic acids) ไดคลอโรอะซิติก (dichloroacetic acid, DCAA) และไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic acid, TCAA) พบว่า โอโซน หรือ แสงยูวี เพียงอย่างเดียวไม่สามารถสลายกรดฮาโลอะซิติกได้ จาก การศึกษาทั้ง 6 แบบ พบว่าการใช้โอโซน/แสงยูวี เหมาะสำหรับการย่อยสลายไดคลอโรอะซิติกและ

ไตรโคลอโรอะซิติก โดยสามารถสลายไตรโคลอโรอะซิติกได้มากกว่าไตรโคลอโรอะซิติก 4 เท่า โดยมีอัตราการย่อยสลายไตรโคลอโรอะซิติกและไตรโคลอโรอะซิติกร้อยละ 41.1 และ ร้อยละ 23.8 ตามลำดับ และยังพบว่ากรดฮิวมิกและไบคาร์บอเนตมีผลกระทบต่ออัตราการสลายกรดฮาลออะซิติก โดยอัตราการย่อยสลายไตรโคลอโรอะซิติกและไตรโคลอโรอะซิติก ที่ความเข้มข้นกรดฮิวมิก 1.2 มิลลิกรัม ทีโอซี/ลิตร และความเข้มข้นไบคาร์บอเนต 10 มิลลิโมลต่อลิตร คือ ร้อยละ 43.5 และ ร้อยละ 25.9 ตามลำดับ

Bledzka และคณะ (2010a) ศึกษาการสลายเอ็น-บิวทิลพาราเบน (n-butylparaben) และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล (4-tert-octylphenol) โดยใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ศึกษาโดยใช้แสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร และความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.1 โมล วัดความเข้มข้นของฮอร์โมนด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) และคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัว จากการศึกษพบว่า การสลายตัวของเอ็น-บิวทิลพาราเบน และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 2 ซึ่งมีค่าทางจลนพลศาสตร์ของการสลายตัวของ เอ็น-บิวทิลพาราเบน และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล คือ  $4.8 \times 10^9$  และ  $4.2 \times 10^9$  ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของพีเอชต่อการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการสลาย เอ็น-บิวทิลพาราเบน และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล ทำการศึกษาโดยควบคุมพีเอช ระหว่าง 5-12 พบว่าพีเอชไม่มีผลต่อการใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการสลาย เอ็น-บิวทิลพาราเบน และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล

Bledzka และคณะ (2010b) ศึกษากระบวนการสลายตัวด้วยแสงและกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงสำหรับฮอร์โมนต่อมไร้ท่อ ทำการศึกษาฮอร์โมน 4 ชนิด คือ บิวทิลพาราเบน (butylparaben) 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล (4-tert-octylphenol) เทรนโบโลน (trenbolone) และโบลดีโนน (boldenone) เปรียบเทียบประสิทธิภาพ 3 วิธี คือ กระบวนการโฟโตไลซิส กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง และกระบวนการออกซิเดชันสารไวต่อแสง (photosensitized oxidation) พบว่า กระบวนการโฟโตไลซิสศึกษาโดยใช้แสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร กำลังวัตต์ 150 วัตต์ สามารถสลาย โบลดีโนน ได้มากที่สุด รองลงมาคือ บิวทิลพาราเบน เทรนโบโลน และ 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล ตามลำดับ พบว่าโบลดีโนนและบิวทิลพาราเบน สามารถสลายได้อย่างรวดเร็วและมีอัตราการสลายใกล้เคียงกัน สำหรับกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงศึกษาโดยใช้แสงยู

วีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า สามารถสลายฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิดได้ทั้งหมด และสามารถสลายฮอร์โมนทั้ง 4 ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบการสลายฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิด ระหว่างกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงกับกระบวนการโฟโตไลซิสพบว่า มีอัตราการสลายของฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิดใกล้เคียงกัน สำหรับกระบวนการออกซิเดชันสารไวต่อแสงสลายฮอร์โมนทั้ง 4 ชนิดได้น้อยและมีอัตราการสลายตัวอย่างช้าๆ

### 3.7.4 การวัดค่าไออาร์พีในกระบวนการออกซิเดชัน

Shi-Long และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการเฟ้นต้นในการบำบัดขั้นต้นสำหรับน้ำเสียที่มีไนโตรเบนซิน โดยการวัดค่า ORP เพื่อแสดงจุดสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยา ทำการศึกษาที่พีเอชเริ่มต้น 3 ค่าไออาร์พีเริ่มต้น 340 มิลลิโวลท์ ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหนักไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเหล็ก (in weight) 6 และอัตราส่วน บีโอดีต่อซีโอดี 0.03 ถึง 0.47 ตรวจสอบวัดการออกซิเดชันของกระบวนการเฟ้นต้น โดยการวัดค่าไออาร์พี จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า ที่เวลา 90 นาที เป็นจุดที่มีค่าไออาร์พีสูงสุดคือ 490 มิลลิโวลท์ จากนั้นค่าไออาร์พีจะลดลงอย่างรวดเร็ว และที่เวลา 150 นาที เป็นจุดที่มีค่าไออาร์พีต่ำสุด คือ 360 มิลลิโวลท์ โดยค่าไออาร์พีที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการออกซิเดชัน ซึ่งจุดที่มีค่าไออาร์พีสูงสุด เป็นจุดที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ถูกใช้ไปจนหมดในการออกซิเดชัน และจุดที่มีค่าไออาร์พีต่ำสุด เป็นจุดสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยา

Lin และคณะ (2012) ศึกษาการตรวจวัดและการควบคุมการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีและการใช้แสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์สำหรับน้ำเสียชุมชน โดยใช้แสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร สำหรับการศึกษากการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีเพียงอย่างเดียว มีปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำ 482,500 ซีเอฟยู ต่อ 100 มิลลิลิตร เมื่อผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวี เป็นเวลา 2 นาที พบว่ามีปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำ 15,500 ซีเอฟยู ต่อ 100 มิลลิลิตร มีอุณหภูมิของน้ำ 25.1 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 8.33 ค่าไออาร์พี 67.7 มิลลิโวลท์ และปริมาณการใช้แสงยูวี 17,865 ไมโครวัตต์-วินาที ต่อตารางเซนติเมตร สำหรับการศึกษากการฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ มีปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำ 485,000 ซีเอฟยู ต่อ 100 มิลลิลิตร เมื่อผ่านการฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวีร่วมกับไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นเวลา 2 นาที พบว่ามีปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำ 13,000 ซีเอฟยู ต่อ

100 มิลลิลิตร มีอุณหภูมิของน้ำ 25.1 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 8.33 ค่าไออาร์พี 274.1 มิลลิโวลต์ และปริมาณการใช้แสงยูวี 17,996 ไมโครวัตต์-วินาที ต่อตารางเซนติเมตร

Lucas และคณะ (2010) ศึกษาการบำบัดซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกด้วยกระบวนการเฟนตัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีในน้ำเสีย ที่อุณหภูมิและค่าพีเอชต่างๆ ทำการศึกษาในถังปฏิกริยาแบบที่ละเท มีอัตราส่วนความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเหล็ก 15:1 ที่อุณหภูมิ 10 20 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 2 3.5 5 7 และ 9 นอกจากนี้ยังทำการวัดค่าดีไอ ค่าพีเอช และค่าไออาร์พีในถังปฏิกริยาร่วมด้วย จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 3.5 สามารถบำบัดซีไอดีในน้ำเสียโรงงานน้ำมันมะกอกได้มากที่สุด โดยในเวลา 1 ชั่วโมง สามารถบำบัดซีไอดีได้ร้อยละ 70 และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 เสมือน และจากผลการวัดค่าไออาร์พี ทำให้ทราบว่า การบำบัดซีไอดีด้วยกระบวนการเฟนตันมีแนวโน้มการออกซิเดชันสูง โดยมีค่าไออาร์พีเริ่มต้น 170 มิลลิโวลต์ เมื่อทำการศึกษาพบว่าค่าไออาร์พีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลา 2 นาที มีค่าไออาร์พี 580 มิลลิโวลต์ จากนั้นค่าไออาร์พีจะค่อยๆลดลง และเมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง มีค่าไออาร์พี 500 มิลลิโวลต์

### 3.7.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการสลายฮอริโมนโดยใช้แสงยูวีในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ จะเห็นได้ว่าฮอริโมนส่วนใหญ่ที่ทำการศึกษาคือจะเป็นฮอริโมนชนิดเอสโตรเจนซึ่งเป็นฮอริโมนเพศหญิง แต่สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับการสลายฮอริโมนชนิดแอนโดรเจนซึ่งเป็นฮอริโมนเพศชายนั้นยังมีข้อมูลอยู่น้อย และจากงานวิจัยโดยส่วนใหญ่การวิเคราะห์ความเข้มข้นของฮอริโมนจะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) โดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า ฮอริโมนแต่ละชนิดสามารถสลายได้ดีตามช่วงความยาวคลื่นแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่ฮอริโมนชนิดต่างๆ จะสามารถสลายได้มากและสามารถสลายได้อย่างรวดเร็วในช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตรซึ่งตรงกับช่วงความยาวคลื่น UV-C และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์พบว่าเป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 และจากการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องค่าพีเอช พบว่า ค่าพีเอชไม่มีผลต่อการฉายแสงสำหรับการสลายฮอริโมนแต่ละชนิด โดยสามารถสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังตารางที่ 2.4

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ โดยการเลือกใช้แสงยูวีที่ช่วงความยาวต่างๆ คือ UV-A UV-B และ UV-C เพื่อทำการศึกษาว่าช่วงความยาวคลื่นใดเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในน้ำได้ดีที่สุด อีกทั้งยังทำการศึกษากำลังวัตต์ที่เหมาะสมสำหรับการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย



ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัย	ประเภท ฮาร์โมน	ความยาวช่วง คลื่น (นาโนเมตร)	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาในการสลาย	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด	การศึกษา เพิ่มเติม	ผลการศึกษา
Colemen และคณะ, 2006	เอสโตร เจน	320-400	125	17 เบต้า-เอสตราไดออล 485 นาที่	100 %	-	-
				17 แอลฟา – เอสทีนิวเอสตราได ออล 120 นาที่			
				เอสโตรรอน 360 นาที่			
Zuo และคณะ , 2006	เอสโตร เจน	300	25	ลดลงอย่างรวดเร็ว	-	ค่าครึ่งชีวิต	1.5 วัน
Zhang และ คณะ, 2007	เอสโตร เจน	238-579	150	4 ชั่วโมง	97 %	ค่าทาง จลพลศาสตร์	เป็นปฏิกิริยา ลำดับที่ 1
		253	15	1 ชั่วโมง	98 %		

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ผู้วิจัย	ประเภท ฮอร์โมน	ความยาวช่วง คลื่น (นาโนเมตร)	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาในการสลาย	ประสิทธิภาพ ในการบำบัด	การศึกษา เพิ่มเติม	ผลการศึกษา
Bledzka และ คณะ, 2010b	เอสโตร เจน	254	150	โบลดีโนน ได้มากที่สุด บิวทิลพาราเบน เทรโนโบลิน 4-เทอร์-ออกทิลฟีนอล	-	-	-
Gryglik และ คณะ, 2010	เอสโตร เจน	254	-	โบลดีโนน 1 นาที	50 %	ค่าพีเอช 5.7-10	ไม่ส่งผลกระทบต่อ การฉายแสง
				เทรโนโบลิน 30 นาที			
Vulliet และ คณะ, 2010	แอนโดร เจน	254	-	9 นาที	90 %	ค่าพีเอช 4-8	ไม่ส่งผลกระทบต่อ การฉายแสง
		313		11 ชั่วโมง			

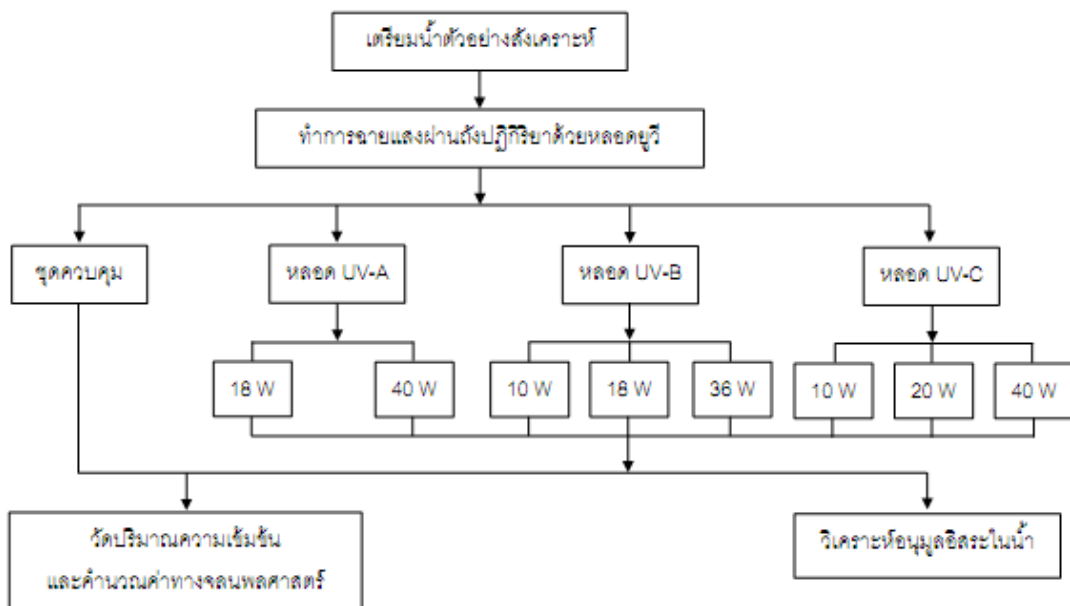
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 แผนการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในน้ำด้วยแสงยูวี ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีรายละเอียดดังนี้

ศึกษาโดยใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ : ในถึงปฏิกิริยาแบบที่ละเท ด้วยแสงยูวีในช่วงความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C และกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน ดังนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษา

### 3.2 ตัวแปรในการทดลอง

ตัวแปรอิสระ คือ

- แหล่งกำเนิดแสง คือ แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต ได้แก่ หลอด UV-A หลอด UV-B และหลอด UV-C
- กำลังวัตต์หลอด UV-A คือ 18 และ 40 วัตต์ หลอด UV-B คือ 10 18 และ 36 วัตต์ และหลอด UV-C คือ 10 20 และ 40 วัตต์

ตัวแปรตาม คือ

- ความเข้มข้นที่ลดลงของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน
- ประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ตัวแปรคงที่ คือ

- ความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน
- ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง 10 ลิตร

### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอด UV-A หลอด UV-B และหลอด UV-C รุ่น TL-K ยี่ห้อ Philips
2. ถังปฏิกิริยาปริมาตรน้ำ 10 ลิตร
3. เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) รุ่น G1311A ยี่ห้อ Agilent Technologies
4. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV- Vis Spectrophotometer) รุ่น Heios Alpha Cat no. 9423 UVA 1002E ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation
5. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)
6. เครื่อง Solid Phase Extraction
7. เครื่อง pH/mV มิเตอร์ รุ่น PH900 ยี่ห้อ AMTAST

8. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
9. ชุดกรองแบบสุญญากาศ
10. เครื่องชั่ง
11. นาฬิกาจับเวลา
12. เข็มฉีดยา ยี่ห้อ Nipro
13. คอลัมน์ C 8
14. ภาชนะกรอง Membrane Filter ยี่ห้อ Filtrex
15. Cartridges ชนิด C 8 Oasis HLB และ PEP ยี่ห้อ Cleanert
16. Syringe Filter ยี่ห้อ Filtrex

### 3.4 สารเคมีและอื่นๆ

1. สาร 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (17 $\alpha$ -Methyltestosterone) ยี่ห้อ Sigma - Aldrich
2. สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate) ยี่ห้อ Ajax
3. สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium Iodide) ยี่ห้อ Ajax
4. สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต (Sodium Thiosulphate) ยี่ห้อ Ajax
5. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium Hydroxide) ยี่ห้อ Ajax
6. สารละลายแอมโมเนียมไนเตรต (Ammonium Nitrate) ยี่ห้อ Ajax
7. เอทิล อะซิเตท (Ethyl acetate) ยี่ห้อ Labscan
8. อะซิโตนไทรล์ (Acetonitrile) ยี่ห้อ Labscan
9. เมทานอล (Methanol) ยี่ห้อ Labscan
10. 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ยี่ห้อ Sigma - Aldrich
11. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) ยี่ห้อ Labscan
12. กรดนาลิดิซิก (Nalidixic Acid) ยี่ห้อ Sigma - Aldrich
13. กรดแทนนิน (Tannin Acid) ยี่ห้อ Sigma - Aldrich
14. ไสโพรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin) ยี่ห้อ Sigma - Aldrich
15. น้ำแป้ง (Soluble Starch)
16. น้ำดีไอ

### 3.5 พารามิเตอร์ต่างๆ

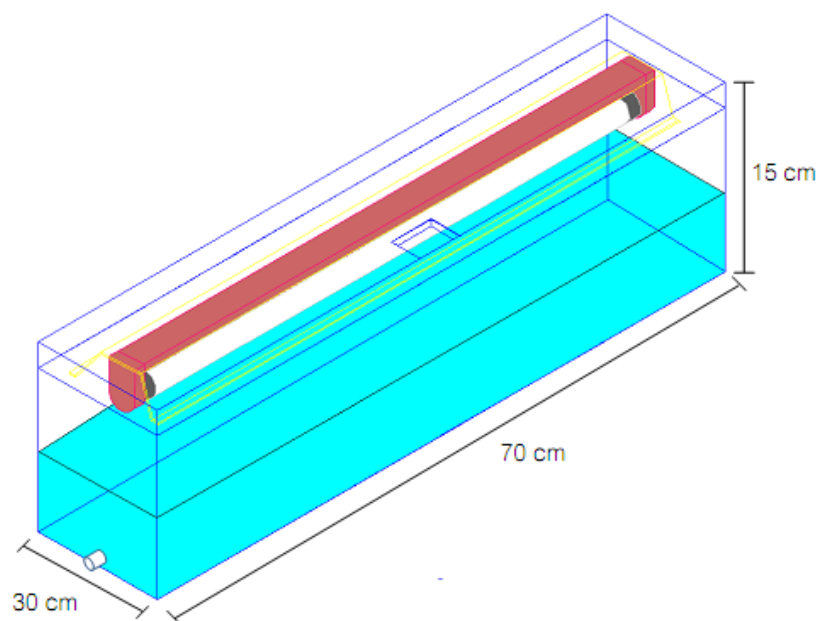
เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในงานวิจัยครั้งนี้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

พารามิเตอร์	เครื่องมือและอุปกรณ์
แหล่งกำเนิดแสง	หลอด UV-A หลอด UV-B และหลอด UV-C
น้ำตัวอย่าง	ถังปฏิกริยาปริมาตรน้ำ 10 ลิตร
ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน	เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC)
การวิเคราะห์อนุมูลไฮดรอกซิลในน้ำ	วิธีไอโอดิเมตริก เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV- Vis Spectrophotometer) และ เครื่อง pH/mV

### 3.6 การออกแบบถังปฏิกริยา

ออกแบบถังปฏิกริยาแบบทีละเท (Batch Reactor) ซึ่งเป็นถังปฏิกริยาแบบปิด ทำด้วยสแตนเลส ติดหลอดยูวีอยู่ด้านบนบนติดกับฝาปิด และมีคอมสัทอนแสงช่วยกระจายแสง ด้านล่างถังมีก๊อกน้ำปิด-เปิดเพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำ ออกแบบถังปฏิกริยาเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 1 ถัง ปริมาตรน้ำตัวอย่างในการทดลองแต่ละครั้งเท่ากับ 10 ลิตร (มีความกว้าง 30 เซนติเมตร ความยาว 70 เซนติเมตร ความสูง 15 เซนติเมตร) (ภาคผนวก ข)



ภาพที่ 3.2 ถังปฏิบัติการ

### 3.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE)

กระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยเครื่อง Solid Phase Extraction โดยมีการวัดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) (ภาคผนวก ก) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของความเข้มข้น จากนั้นเตรียม 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่มีความเข้มข้นต่างๆ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน สำหรับกราฟมาตรฐานใช้สำหรับเปรียบเทียบความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) สำหรับกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) มีวิธีการทดลองดังนี้

1. ปรับสภาพภาชนะที่ใช้ (Cartridge) ด้วยตัวทำละลายดังนี้
  - เอทิลล ออะซีเตท (Ethyl acetate)
  - อะซีโตนไนด์รอล (Acetonitrile)
  - น้ำดีไอ

2. เติมตัวอย่างลงใน Cartridge
3. ล้างด้วย Milipore water เป็นการชะสารที่ไม่ต้องการออก
4. ทำการชะด้วยตัวทำละลายที่รุนแรง
5. นำตัวอย่างที่ได้ ไประเหยตัวทำละลายออก วัดปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC)
6. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1-5 เพื่อวิเคราะห์หาสภาวะการวิเคราะห์ที่เหมาะสม
7. คำนวณ % recovery (Homklin และคณะ, 2010)

$$\% \text{ recovery} = \frac{\text{ความเข้มข้นที่วัดได้}}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

เพื่อให้ได้ % recovery อยู่ในช่วง 70 – 120 %

ทำการวิเคราะห์หาสภาวะการวิเคราะห์ที่เหมาะสมดังนี้

- หาสารในภาชนะ (Cartridge) ที่ใช้ เปลี่ยน Cartridge ที่ใช้เป็น
  - C 18
  - Oasis HLB
  - PEP
- หาปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้
- หาชนิดของตัวทำละลายที่เหมาะสม เปลี่ยนชนิดของตัวทำละลาย ดังนี้
  - อะซีโตไนไตรล์ (Acetonitrile)
  - เอทิล อีเตท (Ethyl acetate)
  - เมทานอล (Methanol)



- Internal Standard

- กรดนาลิดิซิก (Nalidixic Acid)
- กรดแทนนิน (Tannin Acid)
- ไสโพรฟลอกซาซิน (Ciprofloxacin)

### 3.8 การดำเนินงานวิจัย

ศึกษาโดยใช้ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ : ในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท ด้วยแสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C และกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน

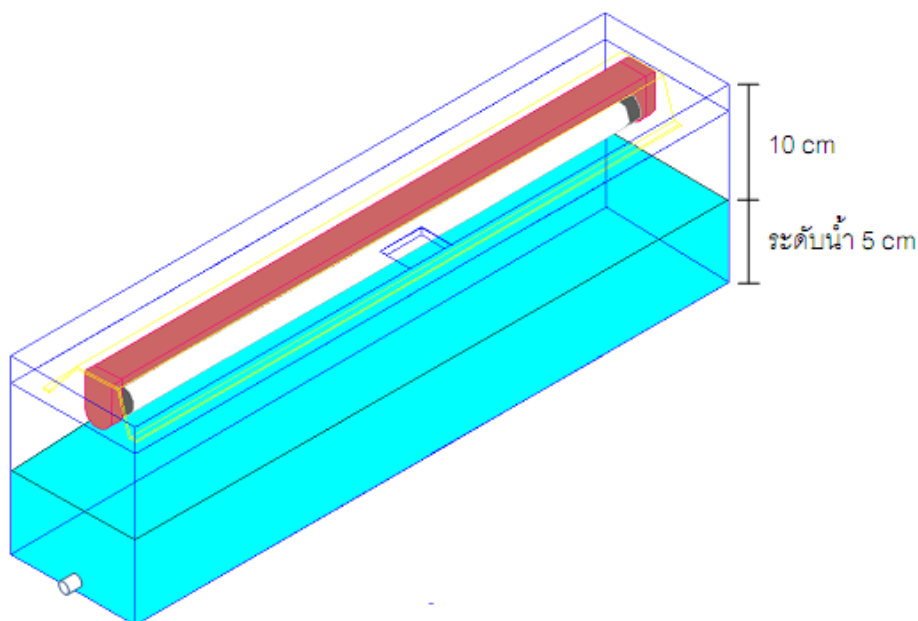
#### 3.8.1 การเตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์

เตรียมน้ำตัวอย่างสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

1. ชั่ง 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักประมาณ 25 มิลลิกรัม ละลายในเมทานอล 500 มิลลิลิตร เป็นสารละลายมาตรฐาน
2. ตวงสารละลายมาตรฐาน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนปริมาณ 20 มิลลิลิตร ผสมลงในน้ำดีไอให้มีปริมาตรน้ำสุดท้าย 10 ลิตร
3. ผสมให้เข้ากัน เกลงในถังปฏิกรณ์
4. ตรวจสอบความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) เพื่อใช้วัดความเข้มข้นที่ถูกต้องและแม่นยำ

### 3.8.2 การฉายแสงผ่านถังปฏิกิริยา

ทำการฉายแสงผ่านถังปฏิกิริยาปริมาตรน้ำ 10 ลิตร ด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C โดยหลอด UV-A ใช้กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์ หลอด UV-B ใช้กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์ และหลอด UV-C ใช้กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ ที่ระดับความสูงน้ำ 5 เซนติเมตร และความสูงจากระดับน้ำถึงหลอดไฟ 10 เซนติเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 3.3 ลักษณะอุปกรณ์สำหรับการฉายแสงผ่านถังปฏิกิริยา

### 3.8.3 การเก็บตัวอย่างน้ำ

เก็บตัวอย่างน้ำหลังทำการฉายแสงผ่านถังปฏิกิริยาปริมาตรน้ำ 10 ลิตร ด้วยหลอดยูวีที่ช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

ตารางที่ 3.2 การเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ตามช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาเก็บน้ำตัวอย่าง	เป็นเวลาทั้งหมด
ชุดควบคุม	-	15 30 60 120 240 นาที และ ทุกๆ 120 นาที (2 ชั่วโมง)	600 นาที (10 ชั่วโมง)
A	18	ทุกๆ 60 นาที (1 ชั่วโมง)	600 นาที (10 ชั่วโมง)
	40	ทุกๆ 60 นาที (1 ชั่วโมง)	300 นาที (5 ชั่วโมง)
B	10	ทุกๆ 30 นาที	300 นาที (5 ชั่วโมง)
	18	ทุกๆ 15 นาที	120 นาที (2 ชั่วโมง)
	36	ทุกๆ 10 นาที	60 นาที (1 ชั่วโมง)
C	10	ทุกๆ 5 นาที	30 นาที
	20	ทุกๆ 3 นาที	15 นาที
	40	ทุกๆ 2 นาที	12 นาที

#### 3.8.4 การวัดปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนและคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์

##### 1. การวัดปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) โดยใช้ คอลัมน์ C 8 (250 มิลลิเมตร x 5 มิลลิเมตร x 4.6 มิลลิเมตร) เป็นเฟสคงที่ (Reverse Phase) ที่อุณหภูมิ  $40 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส ความยาวคลื่น 245 นาโนเมตร และ เฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) คือ อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile) และน้ำดีไอ ที่อัตราไหล 0.5 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ 0 นาที อะซิโตไนไตรล์ 20 % น้ำดีไอ 80 % ที่ 19 นาที อะซิโตไนไตรล์ 96 % น้ำดีไอ 4 % ที่ 20 นาที อะซิโตไนไตรล์ 20 % น้ำดีไอ 80 % และเดินระบบต่อไปอีก 10 นาที อะซิโตไนไตรล์ 20 % น้ำดีไอ 80 %

## สร้างกราฟมาตรฐาน

1. กรองเฟสเคลื่อนที่ คือ อะซีโตไนไตรล์ (Acetonitrile) และน้ำดีไอ ด้วยชุดกรองแบบสุญญากาศใช้กระดาษกรอง Membrane Filter ชนิดไนลอน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
2. เตรียม 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 75 200 500 1000 1500 2000 ไมโครกรัมต่อลิตร
3. กรองสารละลายมาตรฐาน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย Syringe Filter ชนิดไนลอน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
4. วัดความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC)
5. สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน กับ พื้นที่ใต้กราฟ

## ทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง

เมื่อวิเคราะห์หาสารที่จะทำการวิเคราะห์ที่เหมาะสมแล้วให้นำน้ำตัวอย่างที่เพิ่มความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน วัดปริมาณความเข้มข้นด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) มีวิธีการทดลองดังนี้

1. วัดความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานก่อนทำการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างทุกครั้ง
2. นำน้ำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นปรับปริมาตรด้วยตัวทำละลาย
3. กรองตัวอย่างด้วยชุดด้วย Syringe Filter ชนิดไนลอน ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร
4. วัดความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) เทียบกับกราฟมาตรฐาน

## 2. การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์

คำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์จากความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน กับเวลาในการเก็บตัวอย่าง

1. สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่วัดจากเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง กับเวลาในการเก็บตัวอย่าง
2. คำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ (K) จากกราฟระหว่างความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่วัดจากเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูงกับเวลาในการเก็บตัวอย่าง

### 3.8.5 การวิเคราะห์หาอนุมูลอิสระในน้ำ

#### 1. การวิเคราะห์หาอนุมูลอิสระในน้ำด้วยวิธีไอโอโดเมตริก

วิธีไอโอโดเมตริกเป็นการให้เปอร์ออกไซด์ของน้ำที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไอโอไดด์จะได้ไอโอดีน ซึ่งเป็นสารละลายสีน้ำตาล เติมน้ำแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ และหาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นจากการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต มีวิธีการทดลองดังนี้

วิธีการทดลองที่ 1

1. ใส่ตัวอย่างในขวดสีชาปริมาตรน้ำ 20 มิลลิลิตร
2. เติมกรดซัลฟิวริก 2 นอร์มัล ปริมาตร 1 มิลลิลิตร
3. เติม 10 % โพแทสเซียมไอโอไดด์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
4. ปิดฝาขวด เขย่าให้เข้ากัน วางไว้ในที่มืด 10 นาที
5. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน
6. เติม 1 % น้ำแป้ง 2 มิลลิลิตร สารละลายสีเหลืองอ่อน สารละลายสีน้ำเงินกลายเป็นไทเทรตจนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี

### 7. บันทึกปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต

การคำนวณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมสมมูลของเปอร์ออกไซด์ต่อลิตร)

$$= \frac{(A-B) \times (\text{ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต}) \times 1000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

A คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง

B คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตชุดควบคุม

### วิธีการทดลองที่ 2

เตรียมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium Molybdate)

ชั่งสารละลาย แอมโมเนียมโมลิบเดต 9 กรัม ละลายใน แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เติมแอมโมเนียมไนเตรต 2.4 กรัม เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 100 มิลลิลิตร

### วิธีการทดลอง

1. ใส่ตัวอย่างในขวดสีชาปริมาตรน้ำ 30 มิลลิลิตร
2. เติมกรดซัลฟิวริก 2 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
3. เติม 1 % โพแทสเซียมไอโอไดด์ ปริมาตร 10 - 15 มิลลิลิตร
4. เติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 2 หยด
5. ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 นอร์มัล จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน
6. เติม 1 % น้ำแป้ง 2 มิลลิลิตร สารละลายสีเหลืองอ่อน สารละลายสีน้ำเงินกลายเป็นไทเทรตจนสารละลายเปลี่ยนเป็นไม่มีสี
7. บันทึกปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต

การคำนวณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ)

$$= \frac{(A-B) \times (\text{ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต}) \times 1.7}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง}}$$

A คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง

B คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตชุดควบคุม

**หมายเหตุ** การทดลองทั้ง 2 วิธีต้องทำการวิเคราะห์ทันทีหลังการเก็บน้ำตัวอย่าง

## 2. การวิเคราะห์อนุมูลอิสระในน้ำด้วยวิธี DPPH

วิธี DPPH (Diphenyl-2-picrylhydrazyl) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร DPPH ด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี เป็นการทดสอบความสามารถในการทำลายอนุมูลอิสระของสารตัวอย่าง การวัดค่าโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง วัดการลดลงของสี สาร DPPH มีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร (Hou และ คณะ, 2001) มีวิธีการทดลองดังนี้

1. ละลายสาร DPPH ในเมทานอล
2. เติมน้ำตัวอย่างกับละลาย DPPH อัตราส่วน 1 ต่อ 1
3. ทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที
4. วัดค่าการดูดกลืนด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV- Vis Spectrophotometer) ที่

ช่วงความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร

การคำนวณอนุมูลไฮดรอกซิล (ร้อยละ)

$$= \frac{(A-B) \times 100}{A}$$

A = ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH เริ่มต้น

B = ค่าการดูดกลืนแสงของน้ำตัวอย่าง

**หมายเหตุ** ต้องทำการวิเคราะห์ทันทีหลังการเก็บน้ำตัวอย่าง

### 3. การวิเคราะห์ค่าออกซิเดชันในน้ำด้วยการวัดค่าโออาร์พี (ORP)

การวิเคราะห์ค่าออกซิเดชันในน้ำด้วยการวัดค่าโออาร์พี (ORP) ด้วยเครื่อง pH/mV มิเตอร์ โออาร์พีแสดงถึงแนวโน้มในการให้หรือรับอิเล็กตรอน ถ้าโออาร์พีเป็นบวกแสดงว่า ตัวอย่างน้ำ แสดงแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน ในกรณีที่โออาร์พีเป็นลบแสดงว่าตัวอย่างน้ำมีสารละลายที่ แสดงแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอน (มันลิน และ มันรัทซ์, 2547) มีวิธีการทดลองดังนี้

การทดลองในส่วนนี้ทำการทดลองด้วยชุดควบคุม ด้วยน้ำดีไอ และ น้ำตัวอย่างความ เข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ทำการฉายแสงด้วย หลอดยูวีตามกำลังวัตต์ต่างๆ วัดความค่าโออาร์พี (ORP) ด้วยเครื่อง pH/mV มิเตอร์ โดยการจุ่ม โพรบลงในน้ำในถังปฏิกิริยา ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** การวัดค่าโออาร์พี (ORP) สำหรับชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ตามช่วง ความยาวคลื่นและกำลังวัตต์

ช่วงความยาว คลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาวัดค่าโออาร์พี	เป็นเวลาทั้งหมด
A	18	ทุกๆ 120 นาที (2 ชั่วโมง)	600 นาที (10 ชั่วโมง)
	40	60 180 และ 300 นาที (1 3 และ 5 ชั่วโมง)	300 นาที (5 ชั่วโมง)
B	10	ทุกๆ 60 นาที (1 ชั่วโมง)	300 นาที (5 ชั่วโมง)
	18	ทุกๆ 30 นาที	120 นาที (2 ชั่วโมง)
	36	ทุกๆ 20 นาที	60 นาที (1 ชั่วโมง)
C	10	ทุกๆ 10 นาที	30 นาที
	20	3 9 และ 15 นาที	15 นาที
	40	2 4 8 และ 12 นาที	12 นาที



### 3.8.6 การจำแนกผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

จำแนกผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 18 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 10 20 และ 30 นาที โดยนำโครมาโตกราฟีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) มาเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพีคที่เกิดขึ้นตามช่วงเวลา

### 3.8.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในแต่ละชุดการทดลองจะทำการทดลอง 3 ซ้ำ จากนั้นนำผลการทดลองทั้ง 3 ซ้ำที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแม่นยำของผลการศึกษาโดยดูค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ค่า SD) ในแต่ละชุดการทดลอง ซึ่งควรมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกินร้อยละ 10 ทำให้มีค่าความแปรปรวนของข้อมูลแตกต่างกันเล็กน้อย ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและแม่นยำ

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C โดยหลอด UV-A ใช้กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์ หลอด UV-B ใช้กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์ และหลอด UV-C ใช้กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ ในถังปฏิกรณ์ปริมาณน้ำ 10 ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเท่ากับ 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดลองแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) และการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C และคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอัตราการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์อนุมูลอิสระในน้ำหลังการฉายแสง

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่อาจเกิดจากการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังการฉายแสง

เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้น พบว่าให้ผลการทดลองดังนี้

#### 4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) และการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ในการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนนั้นใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธี High Performance Liquid Chromatography ซึ่งความเข้มข้น 17 แอลฟา –

เมทิลเทสโทสเตอโรนที่สามารถวัดได้โดยตรงคือ 70 ไมโครกรัมต่อลิตร ดังนั้นความเข้มข้น 17 แอลฟา –เมทิลเทสโทสเตอโรนที่ต่ำกว่านั้น จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มความเข้มข้นของตัวอย่าง ก่อนทำการวิเคราะห์

กระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของ 17 แอลฟา –เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยเครื่อง Solid Phase Extraction ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) การศึกษาในส่วนนี้เพื่อหาสารในภาชนะ ตัวชะละลายและ อัตราส่วนที่เหมาะสมในกระบวนการ Solid Phase Extraction สำหรับการทดลองในครั้งนี้ ทำการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมดังนี้

#### 4.1.1 การศึกษาสารในภาชนะที่ใช้ (Cartridge) และตัวชะละลายที่เหมาะสม

จากผลการทดลองเปรียบเทียบสารในภาชนะ (Cartridge) ที่ใช้ คือ C 18 Oasis HLB และ PEP และชนิดของตัวชะละลายต่างๆ ดังนี้ อะซีโตไนไตรล์ เอทิล อะซีเตท และ เมทานอล ทำการเพิ่มความเข้มข้น 17 แอลฟา –เมทิลเทสโทสเตอโรน 2 เท่า ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา –เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 300 ไมโครกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า สารในภาชนะ(Cartridge) และตัวทำละลาย ที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction และทำการวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) สำหรับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน คือ ภาชนะ(Cartridge) PEP และตัวชะละลาย เมทานอล โดยมี % recovery คือ 111.12 (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า สารในภาชนะ Oasis HLB และตัวชะละลาย อะซีโตไนไตรล์ มี % recovery น้อยที่สุด คือ 110.42 แต่ไม่เลือกใช้ เพราะเมื่อพิจารณาค่า SD และ %RSD แล้ว สารในภาชนะ PEP และตัวชะละลาย เมทานอล มีค่า SD และ %RSD น้อยที่สุด และมีค่า % recovery อยู่ในช่วงที่ต้องการ สำหรับตัวชะละลาย สามารถทำการทดลองได้เพียง 2 สาร คือ อะซีโตไนไตรล์ และ เมทานอล เท่านั้น เนื่องจากการวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ใช้เฟสเคลื่อนที่คือ อะซีโตไนไตรล์ และ น้ำ แต่เอทิล อะซีเตทไม่สามารถละลายน้ำได้ การทดลองในครั้งนี้จากทำการวิเคราะห์ตัวชะละลายเพียง 2 สารเท่านั้น

ตารางที่ 4.1 ค่า % recovery ของสารในภาชนะ (Cartridge) ที่ใช้และตัวชะละลายต่างๆ

Cartridge	ตัวชะละลาย	% recovery เฉลี่ย	SD	%RSD
C 18	อะซีโตไนไตรล์	126.19	27.02	21.41
	เมทานอล	123.97	26.40	21.29
Oasis HLB	อะซีโตไนไตรล์	110.42	11.43	10.35
	เมทานอล	116.73	11.97	10.26
PEP	อะซีโตไนไตรล์	111.98	11.46	10.23
	เมทานอล	111.12	9.51	8.56

#### 4.1.2 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความเข้มข้น

เมื่อทำการทดลองหาสารในภาชนะ (Cartridge) ที่ใช้และตัวชะละลายที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการทดลองหาอัตราส่วนปริมาณของการปรับสภาพภาชนะ น้ำที่ใช้ในการล้าง และปริมาณตัวชะละลายที่ใช้ ด้วยการเพิ่มความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 20 เท่า ที่ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction สำหรับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน คือ ชุดการทดลองที่ 1 โดยมีอัตราส่วน ดังนี้ ทำการปรับสภาพภาชนะด้วย เอทิล อะซีเตท 5 มิลลิลิตร อะซีโตไนไตรล์ 5 มิลลิลิตร และน้ำ 5 มิลลิลิตร ปริมาณตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำล้าง 5 มิลลิลิตร และทำการชะด้วยเมทานอล 5 มิลลิลิตร โดยมี % recovery คือ 99.72 (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ชุดการทดลองที่ 1 มี % recovery น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาค่า SD และ %RSD ก็มีค่าน้อยที่สุดเช่นกัน จึงพิจารณาเลือกใช้ชุดการทดลองที่ 1 ใช้ในการทดลอง

จากผลการศึกษาสารในภาชนะ (Cartridge) ชนิดของตัวชะละลาย รวมทั้งอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) สำหรับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน มีสถานะที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ ดังนี้ สารในภาชนะ (Cartridge) PEP ทำการปรับสภาพภาชนะด้วยเอทิล อะซีเตท 5 มิลลิลิตร อะซีโตไนไตรล์ 5 มิลลิลิตร และน้ำ 5 มิลลิลิตร ใช้ปริมาณ

ตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ล้างด้วยน้ำ 5 มิลลิลิตร และตัวชะละลายที่เหมาะสม คือ เมทานอลปริมาณ 5 มิลลิลิตร

#### 4.1.3 การศึกษา Internal Standard ที่เหมาะสม

ใช้ยาปฏิชีวนะ 3 ชนิด ในการวิเคราะห์หา internal standard ที่เหมาะสมคือ กรดนาดิติซิก โซโพรฟลอกซาซิน กรดแทนนิน เมื่อวิเคราะห์สารทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ด้วยวิธีการวิเคราะห์เดียวกับ 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน พบว่า กรดแทนนินไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้ สำหรับโซโพรฟลอกซาซินเมื่อผสม 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน ทำให้พีคของ 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนหายไปหลังการวิเคราะห์ สารทั้ง 2 จึงไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ สำหรับกรดนาดิติซิกสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีนี้ โดยสามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นกรดนาดิติซิกได้ต่ำสุด 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำการทดลองด้วยการผสมกรดนาดิติซิกและ 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน ความเข้มข้นกรดนาดิติซิกและ 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรน เริ่มต้น 200 ไมโครกรัมต่อลิตร หลังทำการวิเคราะห์พบว่า กรดนาดิติซิกทำให้ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา-เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลง (ภาคผนวก ค) จะเห็นได้ว่า สารทั้ง 3 ชนิดไม่เหมาะสมสำหรับการเป็น internal standard

เนื่องจาก internal standard ไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ จึงไม่มี internal standard สำหรับการอ้างอิง % recovery ที่ได้จากการเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction แต่จากผลการศึกษาสารในภาชนะที่ใช้ ตัวชะละลาย และอัตราส่วนที่เหมาะสม มี % recovery 99.72 ซึ่งเป็นค่า % recovery ที่ค่อนข้างสูง และทำการควบคุมการตรวจวัดความเข้มข้นโดยการฉีดสารละลายมาตรฐานทุกครั้งก่อนทำการตรวจวัดตัวอย่าง ดังนั้นการไม่มี internal standard ในการอ้างอิง % recovery จึงไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการเพิ่มความเข้มข้นของกระบวนการ Solid Phase Extraction และการวัดความเข้มข้นด้วยด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC)

ตารางที่ 4.2 ค่า % recovery ของอัตราส่วนต่างๆสำหรับการเพิ่มความเข้มข้น

ชุดการทดลองที่	ปรับสภาพภาชนะที่ใช้(มิลลิลิตร)			ปริมาตรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำล้าง (มิลลิลิตร)	ปริมาตรตัวทำละลาย (มิลลิลิตร)	% recovery เฉลี่ย	SD	%RSD
	เอทิลอะซิเตท	อะซิโตนไตรล์	น้ำ						
1	5	5	5	20	5	5	99.72	1.07	1.07
2	5	5	5	20	5	10	105.99	3.26	3.07
3	5	5	5	20	5	20	73.48	3.08	4.19
4	5	5	5	20	10	20	87.41	12.09	13.84
5	5	5	5	20	20	5	67.13	4.36	6.50
6	5	5	5	20	20	10	93.04	5.08	5.46
7	5	5	5	20	20	20	94.99	12.55	13.21
8	5	5	10	20	5	5	99.42	2.05	2.07
9	5	5	10	20	5	10	105.30	4.22	4.01
10	5	5	10	20	20	10	92.51	6.16	6.65

#### 4.1.4 สรุปการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) และการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) มีสภาวะที่เหมาะสมดังนี้ สารในภาชนะ (Cartridge) ชนิด PEP และตัวชะละลาย เมทานอล ด้วยอัตราส่วน การปรับสภาพภาชนะ เอทิล อะซีเตท 5 มิลลิลิตร อะซีโตน ไตรคล 5 มิลลิลิตร และน้ำ 5 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ล้างด้วยน้ำ 5 มิลลิลิตร ชะละลายด้วย เมทานอล ปริมาณ 5 มิลลิลิตร สำหรับ internal standard ที่ทำการศึกษาทั้ง 3 ชนิด ไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ จึงไม่นำ internal standard มาใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction

#### 4.2 ศึกษาการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C และกำลังวัตต์ต่างๆ และคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์

การทดลองในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ทำการทดลองโดยการฉายแสงในถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรน้ำตัวอย่าง 10 ลิตร ความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C โดยหลอด UV-A ใช้กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์ หลอด UV-B ใช้กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์ และหลอด UV-C ใช้กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ เก็บตัวอย่างน้ำที่เวลาต่างๆ จากนั้นทำการเพิ่มความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) และวัดความเข้มข้นด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) รุ่น G1311A ยี่ห้อ Agilent Technologies

#### 4.2.1 การทดลองด้วยชุดควบคุม

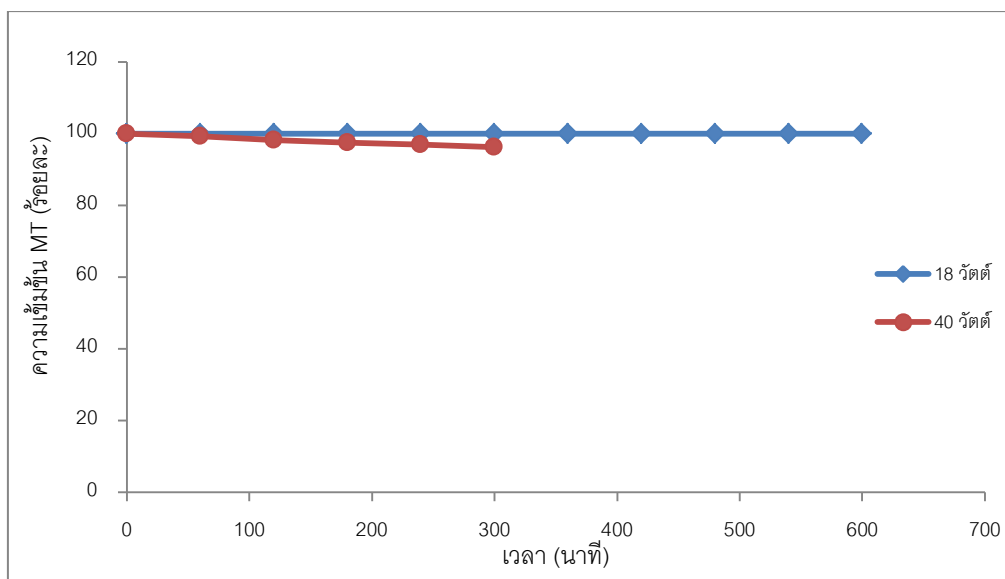
เมื่อทำการทดลองด้วยชุดควบคุม โดยไม่มีการฉายแสงยูวีลงในถังปฏิกริยา และเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ดังนี้ 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง และเก็บทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลาทั้งหมด 10 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่าง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในชุดควบคุม (ภาคผนวก ง) และเมื่อทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที (10 ชั่วโมง) อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาไม่พบการเปลี่ยนแปลง (ภาคผนวก จ)

#### 4.2.2 การฉายแสงด้วยหลอด UV-A

จากการทดลองโดยการฉายแสงด้วยหลอด UV-A (ช่วงความยาวคลื่น 320-400 นาโนเมตร) โดยใช้กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์ ที่กำลังวัตต์ 18 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 60 นาที (1 ชั่วโมง) เป็นเวลา 600 นาที (10 ชั่วโมง) และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า หลังทำการฉายแสงเป็นเวลา 600 นาที (10 ชั่วโมง) ด้วยหลอด UV-A ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างไม่พบการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยมีปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (ภาคผนวก ข) และเมื่อทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาค่อยๆเพิ่มขึ้นทีละน้อย เมื่อเวลาผ่านไป 600 นาที (10 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก จ)

สำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A โดยใช้กำลังวัตต์ 40 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 60 นาที (1 ชั่วโมง) เป็นเวลา 300 นาที (5 ชั่วโมง) และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า หลังทำการฉายแสงเป็นเวลา 300 นาที (5 ชั่วโมง) ด้วยหลอด UV-A ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.1 เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที (5 ชั่วโมง) ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลืออยู่เท่ากับร้อยละ 96.29 (ภาคผนวก ง) และเมื่อทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นทีละน้อย เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที (5 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้น 3 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก จ)





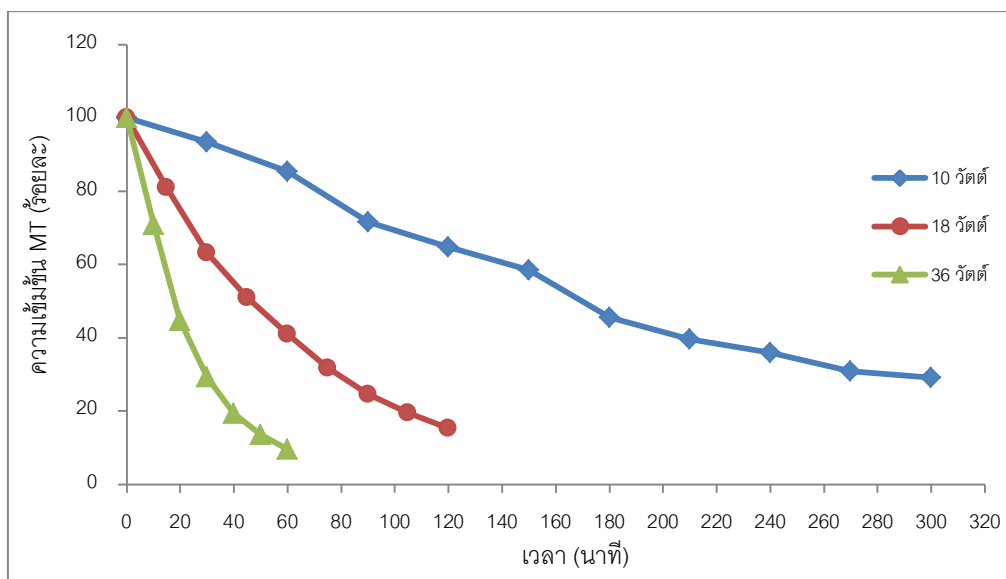
ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์

#### 4.2.3 การฉายแสงด้วยหลอด UV-B

จากการทดลองโดยการฉายแสงด้วยหลอด UV-B (ช่วงความยาวคลื่น 280-320 นาโนเมตร) โดยใช้กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์ พบว่าหลังการฉายแสงด้วยหลอด UV-B โดยใช้กำลังวัตต์ 10 วัตต์ ทำการเก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 300 นาที (5 ชั่วโมง) และวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่ได้เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า หลังทำการฉายแสงเป็นเวลา 300 นาที (5 ชั่วโมง) ด้วยหลอด UV-B ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างค่อยๆ ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 50 ที่เวลา 180 นาที (3 ชั่วโมง) และเมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที (5 ชั่วโมง) ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลงเหลือร้อยละ 29 (ภาคผนวก ง) และอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นที่ละน้อย เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที (5 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้น 2.5 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก จ) และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่าเป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การปฏิกริยา คือ 0.004 ต่อนาที (ภาคผนวก ข)

เมื่อทำการทดลองโดยการฉายแสงด้วยหลอด UV-B ใช้กำลังวัตต์ 18 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่าง ทุกๆ 15 นาที เป็นเวลา 120 นาที (2 ชั่วโมง) และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้ง ที่เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า หลังทำการฉายแสงเป็นเวลา 120 นาที ด้วยหลอด UV-B ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างจะค่อยๆลดลง ดังแสดงในภาพที่ 4.2 โดยความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะลดลงเหลือร้อยละ 50 ที่เวลา 45 นาทีและเมื่อทำการฉายแสงเป็นเวลา 120 นาที (2 ชั่วโมง) ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลงเหลือร้อยละ 15 (ภาคผนวก ง) สำหรับอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที (2 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้น 2 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก จ) และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การปฏิกริยา คือ 0.016 ต่อนาที (ภาคผนวก ข)

เมื่อทำการทดลองโดยการฉายแสงด้วยหลอด UV-B โดยใช้กำลังวัตต์ 36 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่าง ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมง) และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยา ทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า หลังทำการฉายแสงเป็นเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมง) ด้วยหลอด UV-B ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างจะลดลงเรื่อยๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 ที่เวลา 20 นาที ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างลดลงเหลือร้อยละ 45 และเมื่อทำการฉายแสงเป็นเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมง) ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลงเหลือร้อยละ 9 เท่านั้น (ภาคผนวก ง) สำหรับอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที (1 ชั่วโมง) พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก จ) และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การปฏิกริยา คือ 0.040 ต่อนาที (ภาคผนวก ข)



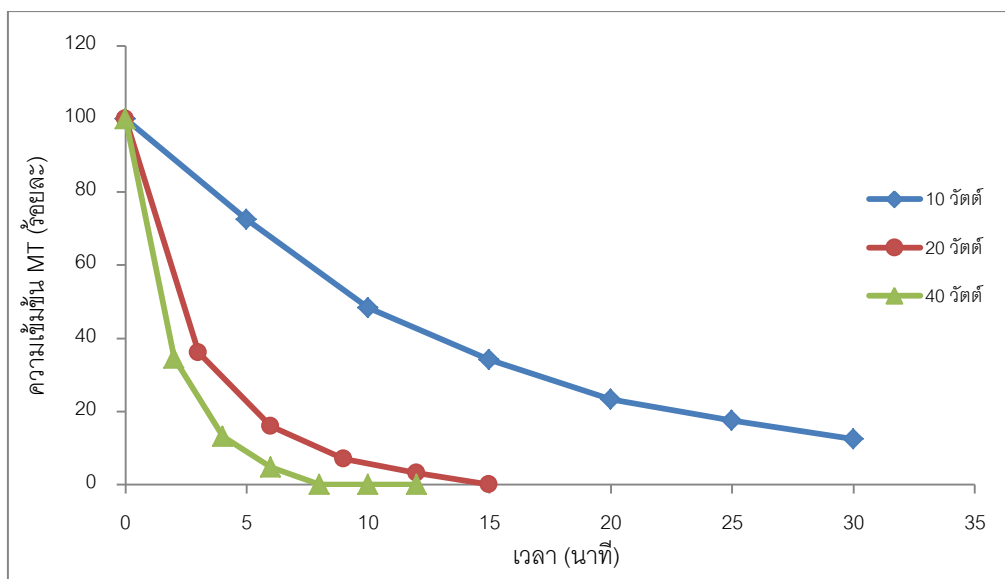
ภาพที่ 4.2 ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์

#### 4.2.4 การฉายแสงด้วยหลอด UV-C

จากการทดลองโดยการฉายแสงด้วยหลอด UV-C (ช่วงความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร) โดยใช้กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ ที่เวลาต่างๆ พบว่า หลังการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที และทำการวัดคุณสมบัติของน้ำในถึงปฏิกิริยาทุกครั้งที่เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างไม่ลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 4.3 โดยใช้เวลา 10 นาที ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างไม่ลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 50 เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลงเหลือร้อยละ 13 (ภาคผนวก ง) สำหรับคุณสมบัติของน้ำในถึงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที พบว่า คุณสมบัติของน้ำในถึงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพียง 0.5 องศาเซลเซียส (ภาคผนวก จ) และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การปฏิกิริยา คือ 0.070 ต่อนาที (ภาคผนวก ข)

จากการทดลองโดยการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ ใ้บนำตัวอย่างต่างๆ 3 นาที เป็นเวลา 15 นาที และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งใ้เก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า ในช่วงเวลา 3 นาทีแรก UV-C สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 4.3 โดยความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะลดลงเหลือร้อยละ 36 หลังจากนั้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนค่อยๆสลาย ซึ่งใช้เวลา 15 นาที ก็ สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน จนต่ำกว่า 3 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ง) เมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ภาคผนวก จ) และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การปฏิกริยา คือ 0.286 ต่อนาที (ภาคผนวก ข)

สำหรับการทดลองการฉายแสงด้วยหลอด UV-C ใช้กำลังวัตต์ 40 วัตต์ ใ้บนำตัวอย่างต่างๆ 2 นาที เป็นเวลา 12 นาที และทำการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งใ้เก็บน้ำ ตัวอย่าง พบว่า ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนลดลงอย่างรวดเร็วตามช่วงเวลา ในการฉายแสง ดังแสดงในภาพที่ 4.3 โดยหลังจาก 2 นาทีแรก ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิล เทสโทสเตอโรนลดลงเหลือร้อยละ 34.44 และใช้เวลาเพียง 8 นาทีก็สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน จนต่ำกว่า 3 ไมโครกรัมต่อลิตร (ภาคผนวก ง) เมื่อทำการวัดอุณหภูมิของน้ำ พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 12 นาที ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยา (ภาคผนวก จ) และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า เป็นปฏิกริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การปฏิกริยา คือ 0.511 ต่อนาที (ภาคผนวก ข)



ภาพที่ 4.3 ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์

#### 4.2.5 วิจัยนผลการศึกษา

จากผลการทดลองด้วยชุดควบคุม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในชุดควบคุม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสน่าจะเกิดขึ้นน้อยมาก และเมื่อพิจารณาระดับอุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาทุกครั้งที่ทำกรเก็บน้ำตัวอย่าง พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แม้จะใช้ระยะเวลาในการฉายแสงนานถึง 10 ชั่วโมง นอกจากนี้ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ยังมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 162-168 องศาเซลเซียส จึงอาจกล่าวได้ว่า อุณหภูมิในการทดลองไม่ทำให้ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการระเหยกลายเป็นไอ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยใช้แสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ พบว่า UV-C สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้มากที่สุดและสามารถสลายได้อย่างรวดเร็ว รองลงมาคือ UV-B และ UV-A ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2007) Gryglik และคณะ (2010) และ Vulliet และคณะ (2010) ซึ่งจากการศึกษาของ Zhang และคณะ (2007) พบว่า ช่วงความยาวคลื่น 253 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่น UV-C สามารถเอสโตรน และ 17 เบต้า – เอสตราไดออลได้มากที่สุด และเมื่อ

คำนวณค่าทางจุลพลศาสตร์พบว่า เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 สำหรับการศึกษานี้ของ Gryglik และคณะ (2010) พบว่า การใช้ UV-C สามารถสลายโบลดีโนนได้มากและสามารถโบลดีโนนได้อย่างรวดเร็ว และสำหรับการศึกษานี้ของ Vulliet และคณะ (2010) ทำการศึกษาโดยใช้แสงยูวีช่วงความยาวคลื่น 254 และ 313 นาโนเมตร พบว่า ช่วงความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นในช่วง UV-C สามารถสลายเทสโทสเตอโรนได้มากกว่าช่วงความยาวคลื่น 313 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวในช่วงคลื่น UV-B โดยการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วย UV-C นั้น อาจเกิดจากทั้งกระบวนการโฟโตไลซิสด้วยแสงยูวีโดยตรงและจากกระบวนการออกซิเดชัน โดยกระบวนการออกซิเดชัน แสงจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้เป็นอนุมูลอิสระ แล้วอนุมูลอิสระ จะเกิดการออกซิเดชันกับตัวอย่าง (De Lasa และคณะ, 1992) สำหรับกระบวนการโฟโตไลซิสเป็นการให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่นเหมาะสมกับพันธะของสารเพื่อให้เกิดการดูดกลืนคลื่นแสงของสารตัวอย่าง (Parsons, 2004) เพราะการเกิดร่วมกันทั้งสองกระบวนการจึงทำให้ UV-C มีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้มาก UV-C จึงสามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับ UV-A และ UV-B

เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางเคมีของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนพบว่า 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตรหรือในช่วง UV-C ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ UV-C ที่สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ UV-A และ UV-B เนื่องจากการใช้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่นพอดีกับพันธะของสาร สารจะเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงได้ดี เมื่อสารนั้นๆ ได้รับช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมแล้ว จะเข้าสู่สภาวะใหม่ที่มีพลังงานสูงขึ้น เป็นสภาวะที่สารถูกกระตุ้น เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในและจะเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการแตกตัวของสาร (Parsons, 2004)

โดยเมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างทางเคมี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเป็นสารประกอบประเภทอีโนน (enone) สารประกอบอีโนนเป็นสารที่มีหมู่คาร์บอนิลคอนจูเกตกับหมู่เอทิลีน หรือสารประกอบคาร์บอนิลไม่อิ่มตัวที่ตำแหน่ง  $\alpha$  และ  $\beta$  อิเล็กตรอนของอีโนนมีการเปลี่ยนระดับพลังงาน 2 แบบ คือ แบบแถบ K ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 220 – 280 นาโนเมตร มีค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี ( $\epsilon$ ) 10,000 – 15,000 และแบบแถบ R ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 300 – 330 นาโนเมตร มีค่า โมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี ( $\epsilon$ ) 20 – 100 ซึ่งมีค่าต่ำ (เย็นหทัย, 2549) จากคำอธิบายข้างต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน เป็นสารประกอบอีโนน จึงดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 220 – 280 นาโนเมตรได้ดี UV-C มีช่วงความยาวคลื่น 100 – 280 นาโนเมตร

ส่งผลให้ UV-C สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับแสงในช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ และการเปลี่ยนระดับพลังงานแบบแถบ R ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 300 – 330 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่น UV-A และ UV-B แต่เนื่องจากช่วงความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่น UV-B มีค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตี ( $\epsilon$ ) 100 โดยมีค่าโมลาร์แอบซอร์ปทิวิตีมากกว่าช่วงความยาวคลื่น 330 นาโนเมตร เป็นช่วงความยาวคลื่น UV-A จะเห็นได้ว่า 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนดูดกลืนแสง UV-B ได้มากกว่า UV-A UV-B จึงสามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้รองจาก UV-C และ UV-A สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ตามกำลังวัตต์ คือ 10 20 และ 40 วัตต์ พบว่าที่ กำลังวัตต์ 40 วัตต์ มีอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมากที่สุด รองลงมาคือ กำลังวัตต์ 20 และ 10 วัตต์ ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการให้กำลังวัตต์มากขึ้นอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนก็จะมากขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยแสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ และกำลังวัตต์ที่แตกต่างกันจากการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่าเมื่อพิจารณาตามช่วงความยาวคลื่น UV-C มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยามากที่สุด รองลงมาคือ UV-B และ UV-A ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตามกำลังวัตต์ของแต่ละช่วงความยาวคลื่น ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาจะมากขึ้นตามกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้น และจากตารางจะเห็นได้ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของ UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 0.511 ต่อนาที แสดงว่า UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ มีการอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Gryglik และคณะ (2010) ซึ่งทำการศึกษาค่าทางจลนพลศาสตร์จากการใช้ UV-C ในการสลายฮอร์โมนเอสโตรเจน 2 ชนิด คือ โบลดีโนน และ เทรโนโบโลน พบว่ามีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของ โบลดีโนน และ เทรโนโบโลน คือ 0.61 และ 0.0029 ต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของโบลดีโนนใกล้เคียงกับการใช้ UV-C ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

#### 4.2.6 การนำผลการศึกษาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยการฉายแสงยูวีที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ มาประยุกต์ใช้

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดตามธรรมชาติ โดยมีดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิด ซึ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตเหล่านี้จะพบในแสงแดดที่ส่องลงมายังโลก โดยช่วงความยาวคลื่น 320 – 400 นาโนเมตร หรือช่วง UV-A เป็นรังสีช่วงที่ส่องมายังโลกมากที่สุด สำหรับช่วงความยาวคลื่น 280 – 320 นาโนเมตร หรือช่วง UV-B รังสีในช่วงนี้ส่องผ่านมายังโลกได้เพียงเล็กน้อย และช่วงความยาวคลื่น 100 – 280 นาโนเมตร หรือ UV-C เป็นรังสีที่ไม่พบในแสงแดดที่ส่องมายังโลกมนุษย์ (Shie, 2007) หากต้องการบำบัดน้ำจากบ่อเลี้ยงปลาที่มี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนตกค้างอยู่ด้วยวิธีปล่อยน้ำทิ้งไว้ให้ได้รับแสงแดดตามธรรมชาติ เพื่อให้เกิดการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน อาจต้องใช้เวลาในการบำบัดนาน เนื่องจาก รังสีที่ส่องมายังโลกคือ UV-A และ UV-B จากผลการทดลอง UV-A พบการเปลี่ยนแปลงของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเพียงเล็กน้อย สำหรับ UV-B แม้จะสามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะค่อยๆ ลดลง จึงต้องใช้ระยะเวลาในการสลาย หากเกษตรกรต้องการบำบัดน้ำโดยใช้ระยะเวลาสั้นๆ ควรติดตั้งหลอด UV-C ในระบบบำบัดน้ำก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

การออกแบบระบบบำบัดน้ำที่มี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนตกค้างจากบ่อเลี้ยงปลา เลือกใช้หลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ เพราะมีความคุ้มค่าในเชิงพลังงานที่ใช้ในการสลายมากที่สุดจากข้อ 4.2.7 ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนให้ ความเข้มข้นลดลงร้อยละ 90 มีเวลาในการทำปฏิกิริยา 9 นาที หรือสำหรับระบบน้ำไหลต่อเนื่องถึงปฏิกิริยาต้องมีเวลากักเก็บน้ำอย่างน้อย 9 นาที โดยทำการคำนวณปริมาตรของบ่อบำบัด จากอัตราการไหลของน้ำที่ต้องการ กับระยะเวลาที่กักเก็บน้ำในระบบอย่างน้อย 9 นาที (ตารางที่ 4.4) เมื่อได้ปริมาตรของบ่อบำบัดจากนั้นทำการคำนวณขนาดของบ่อ โดยกำหนดความสูงของระดับน้ำ 5 เซนติเมตร โดยหลอดยูวีห่างจากผิวน้ำ 10 เซนติเมตร และกำหนดความกว้างจากขนาดของโคมสะท้อนแสงที่ใช้ จะได้ขนาดของบ่อบำบัดที่ต้องการ สำหรับจำนวนหลอด UV-C ที่ใช้ในบ่อบำบัดคำนวณได้จากขนาดของบ่อบำบัด โดยมีตัวอย่างการออกแบบระบบบำบัดน้ำมี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนตกค้างจากบ่อเลี้ยงปลา แสดงในภาคผนวก ข



#### 4.2.7 เปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

เมื่อพิจารณาปริมาณพลังงานที่ใช้ของแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถคำนวณเป็นปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV dose) (ภาคผนวก ข) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณพลังงานที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนให้ ความเข้มข้นลดลงร้อยละ 90 ตามช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน ได้ผลดังแสดงใน ตารางที่ 4.5 โดยพบว่า UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ใช้เวลาในการสลายน้อยที่สุด แต่สำหรับพลังงาน ที่ใช้ UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ มีการใช้พลังงานน้อยที่สุดคือ 10,800 วัตต์-วินาที (ภาคผนวก ข) แม้จะใช้ระยะเวลาในการสลายนานกว่า ดังนั้นการเลือกใช้ UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ จึงมีความ คุ่มค่าในเชิงพลังงานที่ใช้สำหรับการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมากที่สุด

ตารางที่ 4.3 ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามความยาวคลื่นและกำลัง วัตต์ที่แตกต่างกัน

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาเก็บน้ำ ตัวอย่าง (นาที)	ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV dose) (วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร)
A	18	60	31
		120	62
		180	93
		240	123
		300	154
		360	185
		420	216
		480	247
		540	278
		600	309

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาเก็บน้ำ ตัวอย่าง (นาทีก)	ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ( UV dose) (วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร)
A	40	60	69
		120	137
		180	206
		240	274
		300	343
B	10	30	9
		60	17
		90	26
		120	34
		150	43
		180	51
		210	60
		240	69
		270	77
		300	86
		120	62

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาเก็บน้ำ ตัวอย่าง (นาทีก)	ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ( UV dose) (วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร)
B	18	15	8
		30	15
		45	23
		60	31
		75	39
		90	46
		105	54
		120	62
	36	10	10
		20	21
		30	31
		40	41
		50	51
		60	62
C	10	5	1
		10	3
		15	4
		20	6
		25	7
		30	9

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ช่วงเวลาต่างๆ ตามความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาเก็บน้ำ ตัวอย่าง (นาทีก)	ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต ( UV dose) (วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร)
C	20	3	2
		6	3
		9	5
		12	7
		15	9
	40	2	2
		4	5
		6	7
		8	9
		10	11
		12	14

ตารางที่ 4.4 พลังงานที่ใช้ในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนร้อยละ 90 ของช่วงความยาวคลื่นและกำลังวัตต์ต่างๆ

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	เวลาที่ใช้ในการสลาย (นาทีก)	พลังงานที่ใช้ (วัตต์-วินาที)
UV-B	10	575	345,000
	18	144	155,520
	36	58	125,280
UV-C	10	33	19,800
	20	9	10,800
	40	5	12,000

### 4.3 การวิเคราะห์อนุมูลอิสระในน้ำ

การวิเคราะห์อนุมูลอิสระทำให้ทราบถึงแนวโน้มการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสง เพื่อศึกษาแนวโน้มการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนโดยกลไกการออกซิเดชันโดยอนุมูลอิสระ โดยวิธีวิเคราะห์ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารออกซิแดนท์กันได้แก่ วิธีไอโอเมตริกไทเทรต และ วิธี DPPH (Diphenyl-2-picrylhydrazyl)

#### 4.3.1 การวิเคราะห์อนุมูลอิสระในน้ำด้วยวิธีไอโอเมตริกไทเทรต

วิธีไอโอเมตริกไทเทรตเป็นการให้เปอร์ออกไซด์ของน้ำที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไอโอไดด์จะได้ไอโอดีน ซึ่งเป็นสารละลายสีน้ำตาล เติมน้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ และหาปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นจากการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต ซึ่งการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบลูกโซ่ซึ่งอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาโดยตรงกับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน หรืออาจเกิดจากแสงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ ถ้าแสงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำจะเกิดอนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระเพียง 1 อนุมูล สามารถทำให้เกิดเปอร์ออกไซด์ได้เป็นจำนวนหลายร้อยโมเลกุลก่อนสิ้นสุดปฏิกิริยา

วิธีไอโอเมตริกไทเทรตเป็นการวิเคราะห์หาเปอร์ออกไซด์ โดยทำการทดสอบวิธีวิเคราะห์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ผสมกับน้ำ ในอัตราส่วนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน พบว่าสามารถไตเตรทหาปริมาณเปอร์ออกไซด์ได้ (ภาคผนวก ข) แต่เมื่อวิเคราะห์หาสารออกซิแดนท์ในน้ำตัวอย่างหลังทำการฉายแสง โดยเก็บตัวอย่างน้ำและทำการวิเคราะห์ทันที ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง จึงเติมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดตเพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา เมื่อทำการวิเคราะห์ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของน้ำตัวอย่าง อาจเป็นเพราะปริมาณสารออกซิแดนท์ในน้ำตัวอย่างมีปริมาณน้อยเกินกว่าจะวิเคราะห์ได้ด้วยวิธีไอโอเมตริกไทเทรต

#### 4.3.2 การวิเคราะห์อนุมูลอิสระในน้ำด้วยวิธี DPPH (Diphenyl-2-picrylhydrazyl)

วิธี DPPH (Diphenyl-2-picrylhydrazyl) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร DPPH ซึ่งเป็นสารที่มีสีม่วง ด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี เป็นการทดสอบความสามารถในการทำลายของอนุมูลอิสระในสารตัวอย่าง การวัดทำโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร) วัดการลดลงของสีของสาร DPPH (Hou และ คณะ, 2001)

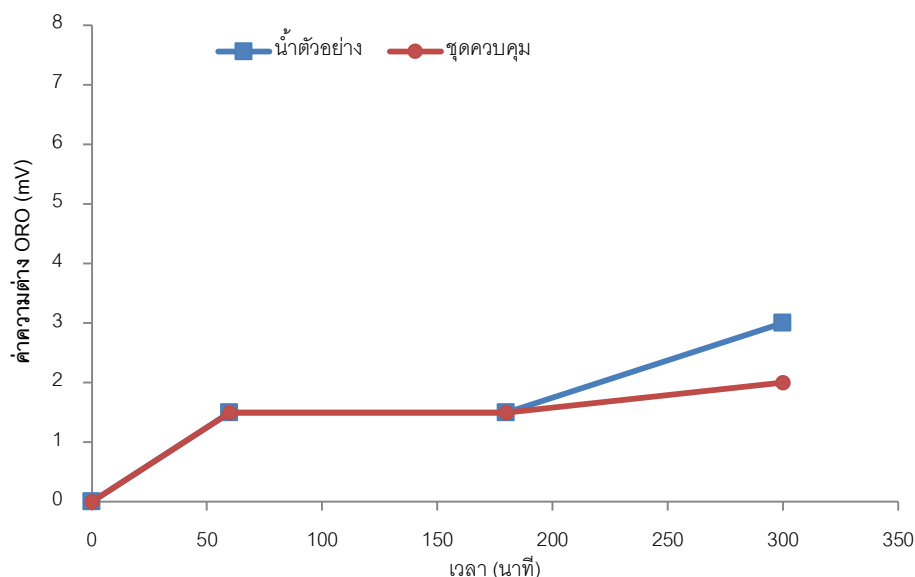
เมื่อวิเคราะห์หาอนุมูลอิสระในน้ำด้วยวิธี DPPH วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrophotometer) รุ่น Heios Alpha Cat no. 9423 UVA 1002E ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation ทำการทดสอบวิธีวิเคราะห์ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH มีค่าแตกต่างกันไปตามความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ภาคผนวก ข) เมื่อนำน้ำตัวอย่างหลังทำการฉายแสงมาวิเคราะห์หาอนุมูลอิสระในน้ำด้วยวิธี DPPH ทำการวิเคราะห์ทันทีหลังการเก็บน้ำตัวอย่าง เมื่อนำน้ำตัวอย่างไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร ไม่สามารถวัดการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงของสารได้ อาจเพราะปริมาณสารออกซิแดนทีในน้ำตัวอย่างมีปริมาณน้อยเกินกว่าจะวิเคราะห์ได้ด้วยวิธี DPPH

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ค่าออกซิเดชันในน้ำด้วยการวัดค่าโออาร์พี (ORP)

การวิเคราะห์ค่าออกซิเดชันในน้ำด้วยการวัดค่าโออาร์พี (ORP) เป็นการวัดค่าคงที่แสดงถึงแนวโน้มในการให้หรือรับอิเล็กตรอน ถ้าโออาร์พีเป็นบวกแสดงว่า ตัวอย่างน้ำแสดงแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน ในกรณีที่โออาร์พีเป็นลบแสดงว่าตัวอย่างน้ำมีสารละลายที่แสดงแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอน (มันสิน และ มันรักษ์, 2547) ทำการทดลองโดยใช้เครื่อง pH/mV มิเตอร์ รุ่น PH900 ยี่ห้อ AMTAST วัดค่าโออาร์พีในชุดควบคุม (น้ำดีไอ) และ น้ำตัวอย่าง ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่ช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ ตามเวลาต่างๆ มีผลการทดลองดังนี้

หลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์ วัดค่าโออาร์พีทั้งชุดควบคุม และ น้ำตัวอย่างในถังปฏิกรณ์ ทุกๆ 180 นาที (2 ชั่วโมง) เป็นเวลา 600 นาที (10 ชั่วโมง) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีที่วัดได้ในชุดควบคุมและในน้ำตัวอย่าง (ภาคผนวก ข) สำหรับค่าโออาร์พี

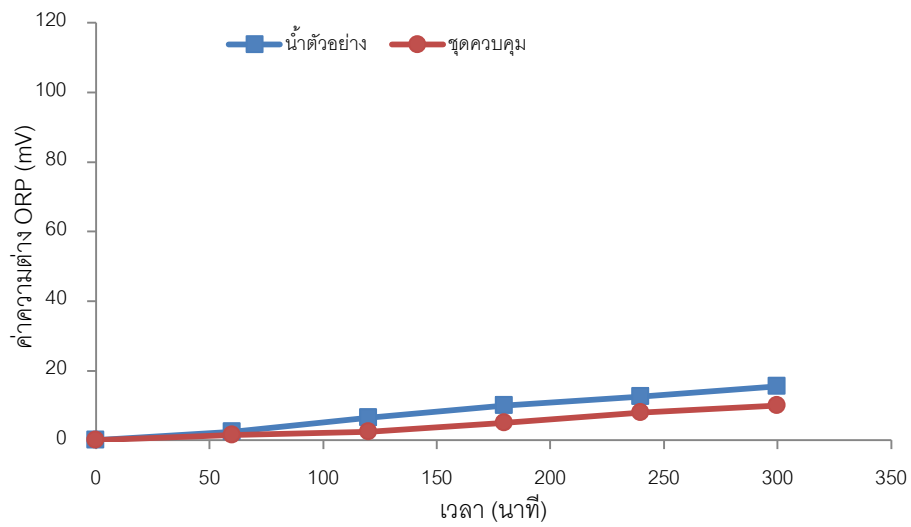
หลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์ วัดค่าไออาร์พีทั้งชุดควบคุม และ น้ำตัวอย่างในถังปฏิกิริยาที่เวลา 60 180 และ 300 นาที ( 1 3 และ 5 ชั่วโมง) ทั้งควบคุมและน้ำตัวอย่างมีค่าไออาร์พีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ภาคผนวก ข)



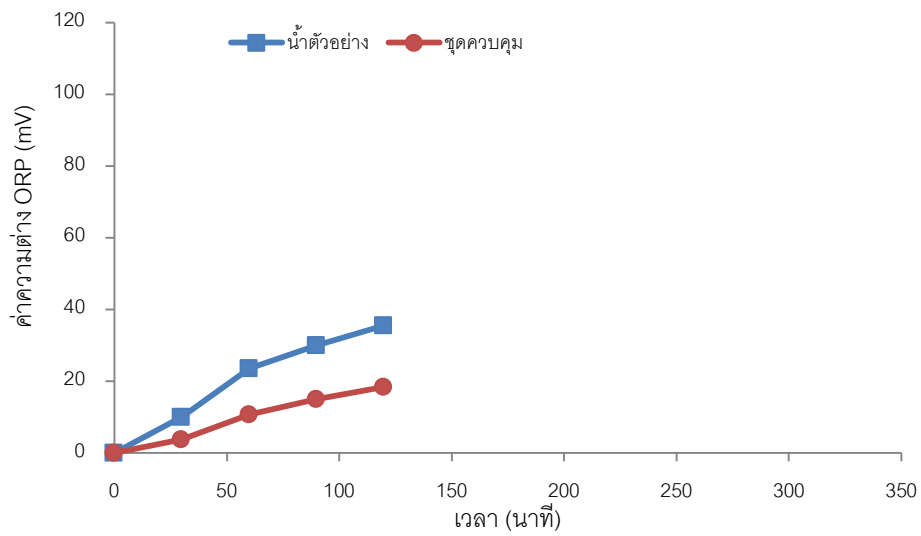
ภาพที่ 4.4 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์

สำหรับหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์ วัดค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างในถังปฏิกิริยา ทุกๆ 60 นาที (1 ชั่วโมง) เป็นเวลา 300 นาที (5 ชั่วโมง) ซึ่งชุดควบคุมมีค่าไออาร์พี 2 3 5 8 และ 10 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) และน้ำตัวอย่างมีค่าไออาร์พี 3 7 10 13 และ 16 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) ที่เวลา 60 120 180 240 และ 300 นาที (1 2 3 4 และ 5 ชั่วโมง) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.5

หลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์ วัดค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างในถังปฏิกิริยา ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 120 นาที (2 ชั่วโมง) มีค่าไออาร์พีของชุดควบคุม 4 11 15 และ 18 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) สำหรับน้ำตัวอย่างที่มีค่าไออาร์พี 10 24 30 และ 36 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) ที่เวลา 30 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.6



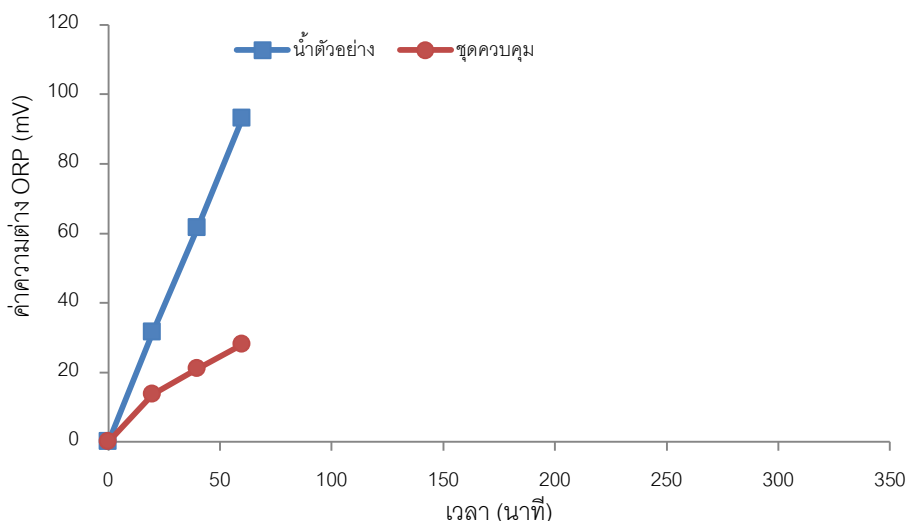
ภาพที่ 4.5 ค่าโออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์



ภาพที่ 4.6 ค่าโออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์



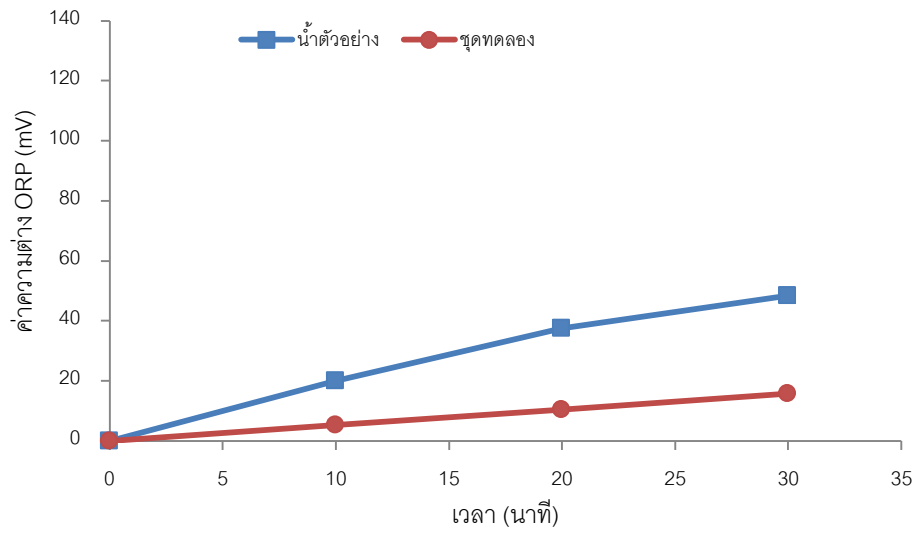
หลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์ วัดค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างในถัง ปฏิบัติทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 60 นาที (1 ชั่วโมง) ซึ่งชุดควบคุมมีค่าไออาร์พี 14 21 และ 28 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) และน้ำตัวอย่างมีค่าไออาร์พี 32 62 และ 93 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) ที่เวลา 20 40 และ 60 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.7



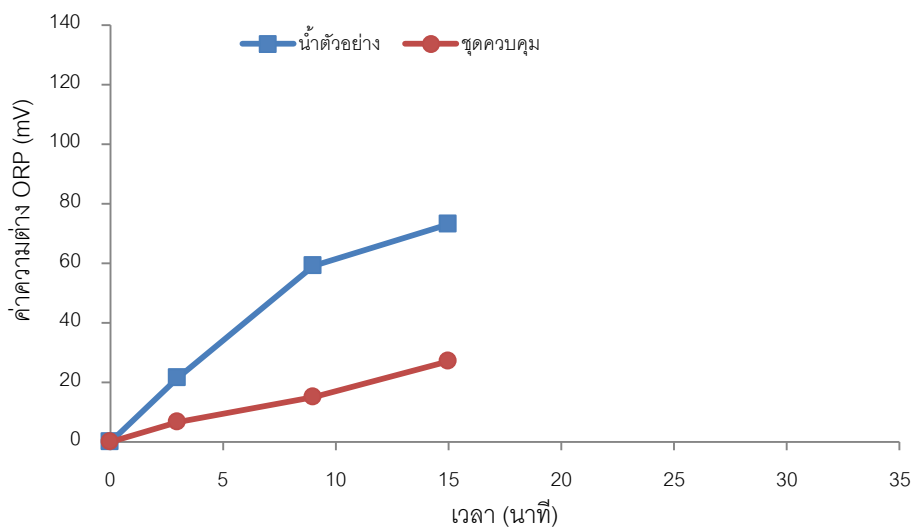
**ภาพที่ 4.7** ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์

สำหรับหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์ วัดค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างในถัง ปฏิบัติทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที โดยชุดควบคุมมีค่าไออาร์พี 5 10 และ 16 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) และน้ำตัวอย่างมีค่าไออาร์พี 20 38 และ 49 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.8

หลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ วัดค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างในถัง ปฏิบัติ ที่เวลา 3 9 และ 15 นาที โดยชุดควบคุมมีค่าไออาร์พี 7 15 และ 27 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) และน้ำตัวอย่างมีค่าไออาร์พี 22 59 และ 73 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) ที่เวลา 3 9 และ 15 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.9

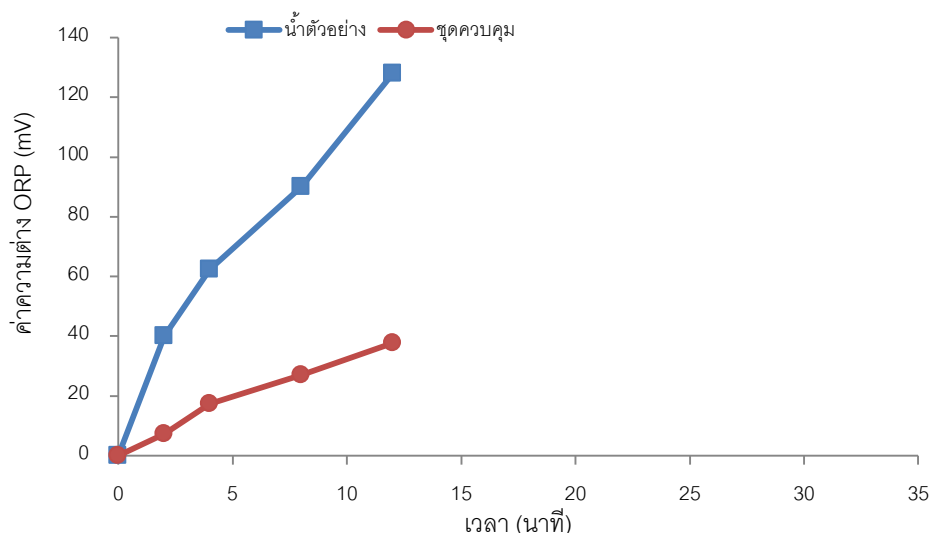


ภาพที่ 4.8 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์



ภาพที่ 4.9 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์

หลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ วัดค่าโออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างในถังปฏิกิริยา ที่เวลา 2 4 8 และ 12 นาที โดยมีค่าโออาร์พีในชุดควบคุม 7 17 27 และ 38 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) สำหรับน้ำตัวอย่างที่มีค่าโออาร์พี 40 63 90 และ 128 มิลลิโวลท์ (ภาคผนวก ข) ที่เวลา 2 4 8 และ 12 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ค่าโออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างชุดควบคุมที่ใช้น้ำดีไอกับน้ำตัวอย่าง ค่าโออาร์พีของน้ำตัวอย่างที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าโออาร์พีที่วัดได้ของชุดควบคุม ซึ่งอาจสรุปได้ว่า UV-B และ UV-C 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าน้ำ แสงจึงทำปฏิกิริยากับ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้มากกว่าน้ำ แนวโน้มการเกิดออกซิเดชันของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในน้ำจึงมากกว่าการออกซิเดชันของน้ำเอง ส่งผลให้ค่าโออาร์พีของน้ำตัวอย่างมีค่ามากกว่าค่าโออาร์พีของชุดควบคุม

ค่าโออาร์พีในแต่ละชุดการทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการฉายแสง 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะดูดกลืนคลื่นแสง เมื่อ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้รับช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม จะเข้าสู่สภาวะใหม่ซึ่งจะมีพลังงานสูงขึ้น เป็นสภาวะที่สารถูกกระตุ้น เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในทำให้เกิดปฏิกิริยา และเกิดการแตกตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเป็นอนุมูลอิสระ (Parsons, 2004) อนุมูลอิสระเหล่านั้นเกิดการ

ออกซีเดชันต่อไปเรื่อยๆ เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ทำให้เกิดการสะสมของอนุมูลอิสระในน้ำตัวอย่าง เมื่อวัดค่าไออาร์พีจึงมีค่าไออาร์พีเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ

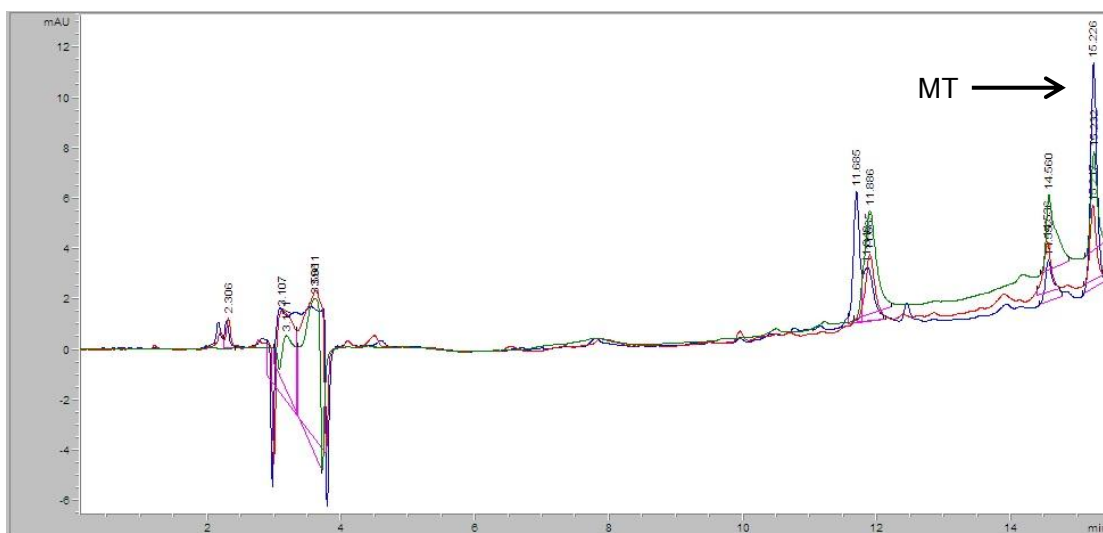
เมื่อเปรียบเทียบค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C จะเห็นได้ว่า UV-C มีค่าไออาร์พีมากที่สุด ซึ่งมีค่าไออาร์พีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว รองลงมา คือ UV-B ค่าไออาร์พีมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วน UV-A ค่าไออาร์พีมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณากำลังวัตต์ตามช่วงความยาวคลื่น จะเห็นได้ว่าแต่ละช่วงความยาวคลื่นเมื่อมีกำลังวัตต์มากขึ้น ค่าไออาร์พีก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย แต่สำหรับ UV-A แม้จะใช้กำลังวัตต์ที่มากที่สุดในการทดลองคือ 40 วัตต์ และใช้เวลาในการฉายแสงนานถึง 600 นาที (10 ชั่วโมง) ค่าไออาร์พีไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน เนื่องจาก UV-A เป็นแสงช่วงความยาวคลื่นที่ไม่เหมาะสมกับพันธะของสาร 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจึงเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงได้น้อย ต่างจาก UV-C เนื่องจาก UV-C มีช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับพันธะของสาร 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจึงเกิดการดูดกลืนคลื่นแสงได้ดีทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มาก และเกิดการแตกตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมากกว่าช่วงความยาวคลื่นช่วงอื่นๆ และเมื่อให้กำลังวัตต์ในการทดลองมากขึ้น จะทำให้เกิดพลังงานในการกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวของสารมากขึ้นด้วย ส่งผลให้การวัดค่าไออาร์พีในน้ำตัวอย่างของ UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ มีค่าไออาร์พีมากที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ และกำลังวัตต์ต่างๆ

#### 4.3.4 การวิเคราะห์แนวโน้มกลไกการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงยูวี

การสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงยูวีนั้น อาจเกิดจากกระบวนการโฟโตไลซิสหรือกระบวนการออกซีเดชัน แต่เนื่องจากผลการวิเคราะห์อนุมูลอิสระหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C โดยการวัดค่าไออาร์พี ไม่สามารถสรุปแนวโน้มการออกซีเดชันด้วยแสงยูวี ได้ว่าเกิดจากกระบวนการใดเป็นกลไกหลัก แต่จากผลการศึกษาการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วย UV-A UV-B และ UV-C และการวิเคราะห์ค่าไออาร์พีทำให้ทราบได้เพียงว่าการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงยูวีนี้นั้นมีแนวโน้มการเกิดร่วมกันจากทั้ง 2 กระบวนการ คือ กระบวนการโฟโตไลซิสและกระบวนการออกซีเดชัน

#### 4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน หลังการฉายแสง เลือกรวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ เนื่องจากเป็นช่วงความยาวคลื่นที่สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับช่วงความยาวคลื่นอื่นๆ และเลือกใช้กำลังวัตต์ 20 วัตต์ เนื่องจาก กำลังวัตต์ 20 วัตต์ เป็นกำลังวัตต์ที่มีอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ไม่เร็วเกินไปและไม่ช้าเกินไป ซึ่งอาจจะสามารถนำผลจากการตรวจวัด มาวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการเปลี่ยนรูป 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้ชัดเจนกว่า กำลังวัตต์ 10 และ 40 วัตต์ ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) โดยเพิ่มความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เก็บน้ำตัวอย่างที่เวลา 10 20 และ 30 นาที



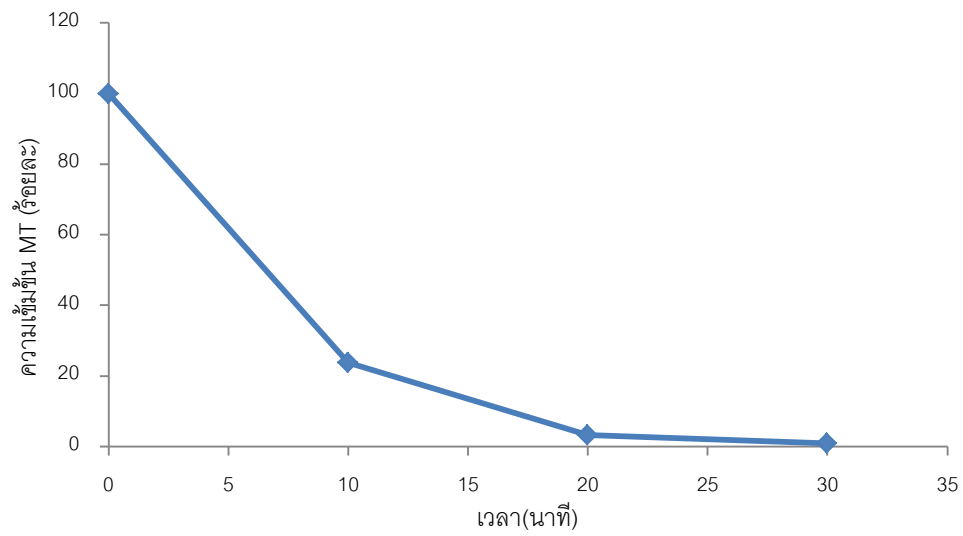
ภาพที่ 4.11 โครมาโตกราฟีวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.11 โครมาโตกราฟีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) เมื่อนำผลการตรวจวัด 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ทั้ง 3 ช่วงเวลามาเปรียบเทียบ ไม่พบพีคที่เกิดขึ้นเพิ่มเติม สำหรับพีค 17 แอลฟา – เมทิลเทส

โทสเดอโรนจะลดลงตามช่วงเวลาการฉายแสง ทำให้การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรน ไม่เห็นผลการวิเคราะห์ที่ชัดเจน อาจมีสาเหตุมาจากผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนเกิดขึ้นแล้วสลายไปอย่างรวดเร็ว เมื่อนำมาตรวจวิเคราะห์จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของโครมาโตกราฟี และอีกเหตุผลหนึ่งอาจมาจากข้อจำกัดของเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ด้วย เพื่อให้การวิเคราะห์มีความชัดเจนมากขึ้น ควรมีการเชื่อมต่อแมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) กับเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) รวมเรียกเครื่องมือชนิดนี้ว่า High Performance Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (HPLC - MS) แมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดที่มีความเฉพาะและมีสภาพไวสูง แมสสเปกโตรมิเตอร์ (MS) จะตรวจสอบดูว่าองค์ประกอบต่างๆ ที่ออกมาจากเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) มีเลขมวล (mass number) เท่าไร เพื่อจะทำนายต่อไปว่าสารที่เกิดขึ้นประกอบด้วยองค์ประกอบชนิดใดบ้าง มีปริมาณเท่าไร เป็นการตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารนั้นๆ และนำข้อมูลที่ได้ไปเทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง แล้วแปลผลออกมา ทำให้เราทราบผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการเปลี่ยนรูป 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนเป็นสารชนิดใด (Kellner และคณะ, 2004)

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนเป็น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 18 วัตต์ เก็บน้ำตัวอย่างทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 30 นาที สามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนจะลดลงตามเวลาต่างดังนี้ ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนลดลงเหลือร้อยละ 23.81 3.17 และ 0.98 ที่เวลา 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ แสดงในภาพที่ 4.11 เมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาสำหรับการฉายแสง เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา คือ 0.159 ต่อนาที

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรน ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร กับ 100 ไมโครกรัมต่อลิตรตามผลการทดลองข้อ 4.2.3 จะเห็นได้ว่า ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา คือ 0.286 ต่อนาทีซึ่งมีอัตราการสลายมากกว่าเมื่อเทียบกับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนน่าจะมีผลกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเดอโรนด้วยแสง UV-C



ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนที่เหลือหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ของการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในน้ำ ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ และใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน ทำการทดลองด้วยหลอด UV-A UV-B และ UV-C โดยหลอด UV-A ใช้กำลังวัตต์ 18 และ 40 วัตต์ หลอด UV-B ใช้กำลังวัตต์ 10 18 และ 36 วัตต์ และหลอด UV-C ใช้กำลังวัตต์ 10 20 และ 40 วัตต์ ในถังปฏิกิริยาปริมาณน้ำ 10 ลิตร ความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ และกำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน รวมทั้งวิเคราะห์หาอนุมูลอิสระในน้ำ และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังการฉายแสง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction (SPE) และวิเคราะห์ปริมาณ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่าง

สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Solid Phase Extraction คือ สารในภาชนะ (Cartridge) ชนิด PEP และตัวชะละลาย เมทานอล ด้วยอัตราส่วน การปรับสภาพภาชนะ เอทิลอะซิเตท 5 มิลลิลิตร อะซิโตนไตรรล์ 5 มิลลิลิตร และน้ำ 5 มิลลิลิตร ปริมาณน้ำตัวอย่าง 20 มิลลิลิตร ล้างด้วยน้ำ 5 มิลลิลิตร ชะละลายด้วย เมทานอล ปริมาณ 5 มิลลิลิตร

##### 5.1.2 ผลการศึกษาการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น UV-A UV-B และ UV-C และค่าทางจลนพลศาสตร์

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนตามช่วงความยาวคลื่นต่างๆ พบว่า UV-C มีประสิทธิภาพในการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมากที่สุดและสามารถสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนได้อย่างรวดเร็ว รองลงมาคือ UV-B



ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะค่อยๆลดลงตามช่วงเวลาที่ได้รับแสง และ UV-A ความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และเมื่อคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ พบว่าเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 โดย UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยามากที่สุด คือ 0.511 ต่อนาที

### 5.1.3 ผลการศึกษาอัตราการสลายตัวของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน โดยใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองการฉายแสงโดยใช้กำลังวัตต์ที่แตกต่างกัน สำหรับ UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์ และ UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ มีอัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนมากที่สุด รองมาคือ UV-B กำลังวัตต์ 18 UV-C 20 วัตต์ และ UV-B UV-C 10 วัตต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อกำลังวัตต์เพิ่มขึ้น อัตราการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนก็จะมากขึ้นด้วย

การสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร สามารถสลายได้อย่างรวดเร็วและสามารถสลายได้มากที่สุด ด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์ เนื่องจาก 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 100 – 280 นาโนเมตรได้ดี และการฉายแสงด้วยหลอด UV-C เกิดทั้งกระบวนการโฟโตไลซิสด้วยแสงยูวี โดยตรงและจากกระบวนการออกซิเดชัน

### 5.1.4 ผลการวิเคราะห์หาค่าออกซิเดชันในน้ำ

ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไอโอโดเมตริก ไทเทรต วิธี DPPH และวัดค่าไออาร์พี ซึ่งวิธีไอโอโดเมตริก ไทเทรต และวิธี DPPH ไม่สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกซิเดชันในน้ำตัวอย่างได้

การวัดค่าไออาร์พีเพื่อดูแนวโน้มค่าออกซิเดชันในน้ำหลังทำการฉายแสง จะเห็นได้ว่า การฉายแสงด้วยหลอด UV-C ในน้ำตัวอย่างมีค่าไออาร์พีมากที่สุด รองลงมาคือ UV-B และ UV-A ตามลำดับ และค่าไออาร์พีจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังวัตต์ที่มากขึ้นด้วย

### 5.1.5 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลายของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังการฉายแสง

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ ความเข้มชั้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบโครมาโตกราฟีที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) ไม่พบพีคที่เกิดขึ้นเพิ่มเติม สำหรับพีคของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนจะลดลงตามช่วงเวลาการฉายแสง ทำให้การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ไม่เห็นผลการวิเคราะห์ที่ชัดเจน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากศึกษาการย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ควรทำการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

5.2.1 ให้ศึกษาการย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนด้วยรังสีชนิดอื่นๆ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสลายกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

5.2.2 ให้ศึกษาการวิเคราะห์หาอนุผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในน้ำตัวอย่างหลังทำการฉายแสงด้วยวิธีที่แตกต่างจากการวิจัยในครั้งนี้

5.2.3 ให้ศึกษาการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังการฉายแสง ด้วยเครื่องมืออื่นๆ เช่น High Performance Liquid Chromatography - Mass Spectrometer (HPLC - MS)

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กมลวรรณ ปรีชาวนา. 2547. ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อในระบบผลิตน้ำประปาด้วยโอโซนและรังสีอัลตราไวโอเล็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จิรศักดิ์ ตั้งตรงไพโรจน์. 2540. ฮอริโมนกับการเพาะเลี้ยงปลาสวยงาม. สัตว์น้ำ. 8(89): 109-114.
- บุญรัตน์ ประทุมชาติ, วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย และบัลลังก์ เนื่องแสง. 2546. การพัฒนาสูตรอาหารและการใช้ฮอริโมนเทสโทสเตอโรน อันเดคาโนเอต เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโต เเร่งสี และการแปลงเพศของปลาหางนกยูง. ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 64 หน้า.
- ประมง, กรม. 2540. การทำธุรกิจปลาสวยงาม. กรุงเทพมหานคร : สถาบันพัฒนาปลาสวยงาม และพรรณไม้น้ำ. 98 หน้า.
- ประเสริฐ มีรัตน์. 2538. กายวิภาคศาสตร์และสรีรวิทยามนุษย์1. ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐานการพยาบาล มหาวิทยาลัยบูรพา. 207 หน้า.
- ปรีศินี เจริญสิน. 2549. การกำจัดไซยาไนด์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและไททาเนียมไดออกไซด์ในการไหลแบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปวีตรา ชาติสุกานต์. 2551. การดูดซับของสารเมทิลเทสโทสเตอโรนโดยตะกอนดินชนิดต่างๆ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต. สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มณฑิรา ตันท์เกยูร. 2541. เภสัชวิทยาของฮอริโมนและยาต้านฤทธิ์ฮอริโมน. คณะแพทยศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 404 หน้า
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2546. ความหมายของระบบไร้อากาศ. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร : กรมควบคุมมลพิษ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 161 หน้า
- มันสิน ตันกุลเวศม์ และมันรัช ตันกุลเวศม์. 2547. ความต่างศักย์โออาร์พี. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- เย็นหทัย แน่นหนา. 2549. อัลตราไวโอเล็ตสเปกโทรสโกปี. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 530 หน้า
- วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. 2546. ฮอร์โมน. วิทยาต่อมไร้ท่อของปลาและครึ่งเตี๋ย. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 45-71 หน้า.
- ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์. เครื่องมือวิทยาศาสตร์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.kmitl.ac.th/sisc/index.html>. [2554, ธันวาคม 18]
- สุมนา ชมพูทวีป. 2541. เภสัชวิทยาของฮอร์โมน. ภาควิชาเภสัชวิทยา, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 203 หน้า.
- หลักการเครื่อง High Performance Liquid Chromatograph. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [www.ndeanly.com](http://www.ndeanly.com) . [2554, ธันวาคม 18]
- อาทิตย์พันธุ์ สัยยะนิจู. 2547. การลดความเป็นพิษของน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยกระบวนการอัลตราไวโอเล็ต/ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ วิทยานิพนธ์ปริญญาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อุดม เรืองนพคุณ. 2548. การแปลงเพศปลานิลโดยใช้ฮอร์โมน. การเลี้ยงปลานิล กรุงเทพมหานคร : อักษรสยามการพิมพ์. 36-38 หน้า.
- อุตุนิยมวิทยา,กรม. ศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซนและรังสี สำนักตรวจและเฝ้าระวังสภาวะอากาศ. ไอโซน รังสีดวงอาทิตย์ และมลภาวะ. [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://ozone.tmd.go.th/uvbasic.htm>. [2554, พฤศจิกายน 4]

## ภาษาอังกฤษ

- Bledzka, D., Gryglik, D., Olak, M., Gebicki, J.L., and Miller, J.S. 2010a. Degradation of n-butylparaben and 4-tert-octylphenol in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV system. Radiation Physics and Chemistry. 79: 409-416.
- Bledzka, D., Gmurek, M., Gryglik, M., Olak, M., Miller, J.S., and Ledakowicz, S. 2010b. Photodegradation and advanced oxidation of endocrine disruptors in aqueous solutions. Catalysis Today. 151: 125-130.
- Boxall, A.B.A., Fogg, L.A., Blackwell, P.A., Kay, P., Pemberton, E.J., and Croxford, A. 2004. Veterinary Medicines in the Environment. Review of Environmental Contamination and Toxicology. 180:1-91.
- Coleman, H.M., Routledge, E.J., Sumpter, J.P., Eggins, B.R., and Byrne, J.A. 2004. Rapid loss of Estrogenicity of steroid estrogens by UVA photolysis and photocatalysis over an immobilized titanium dioxide catalyst. Water Research. 38: 3233-3240.
- De Lasa, H.I., Dogu, G., and Ravella, A. 1992. Chemical Reactor Technology for Environmentally Safe Reactors and Product. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 577-608.
- Fitzpatrick, M. S. and Contreras-Sanchez, W. M. 2000. Fate of Methyltestosterone in the pond environment: detection of MT in soil after treatment with MT food. PD/A CRSP seventeenth annual technical report. pp. 109-112. Oregon State University, Corvallis, Oregon, U.S.A.
- Francesc, P. 2001. Endocrine sex control strategies for the feminization of teleost fish. Aquaculture. 197 (1-4): 229-281.
- Garces, J. 2006. Oxidation. [Online]. Available: [http:// www. Kangenwaterreport.com/ what-is-redox/](http://www.Kangenwaterreport.com/what-is-redox/) [13 Mar 2013].
- Gryglik, D., Olak, M., and Miller, J.S. 2010. Photodegradation kinetics of androgenic steroids boldenone and trenbolone in aqueous solutions. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 212: 14-19.

- Halliwell, H. 2009. The wanderings of a free radical. Free Radical Biology and Medicine. 46: 531-542.
- Homklin, S., Ong, S.K., and Limpiyakorn, T. 2010. Biotransformation of 17 $\alpha$ -methyltestosterone in sediment under different electron acceptor conditions. Chemosphere. 068: 211-217.
- Howell, W.M., and Denton, T.E. 1989. Gonopodial morphogenesis in female mosquitofish, *Gambusia affinis affinis*, masculinized by exposure to degradation products from plant sterols. Environmental Biology of Fishes. 24: 43-51.
- Hou, W.C., Chen, Y.C., Lin, Y.H., Yang, L.L., and Lee, M.H. 2001. Antioxidant activities of trypsin inhibitor a 33 kDa root storage protein of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam cv. Tainong 57). J. Agric. Food Chem. 49: 2978-2981.
- Huber, M.M., Canonica, G.Y.P., and Gunten, U.V. 2003. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation and advanced oxidation processes. Environmental Science and Technology. 37: 1016-1024.
- Huber, M.M., Ternes, T.A., and Gunten, U.V. 2004. Removal of estrogenic activity and formation of oxidation products during ozonation of 17 $\alpha$ -ethinylestradiol. Environmental Science and Technology. 38: 5177-5186.
- Huber, M.M., Gobel, A., Joss, A., Hermann, N., Loffler, D., Mcardell, C.S., Ternes, T.A., and Gunten, U.V. 2005. Oxidation of pharmaceuticals during ozonation of municipal wastewater effluents: A pilot study. Environmental Science and Technology. 39: 4290-4299.
- Hudson, B.J.F. 1990. Food antioxidants. Elsevier science publisher Ltd. England.
- Irmak, S., Erbatur, O., and Akgerman, A. 2005. Degradation of 17 $\beta$ -estradiol and bisphenol A in Aqueous medium by using ozone and ozone/UV techniques. Journal of Harardous Materials. 126: 54-62.
- Jobling, M. 1995. Environmental Biology of Fishes. Chapman and hall, London. 455 pp.
- Kavlock, R. J. 1991. Overview of endocrine disruptor research activity in the United States. Chemospere 39: 1227-1236.

- Kellner, R., Mermet, J.M., Otto, M., Valcarcel, M., and Widmer, H.M. 2004. Science Analytical Chemistry. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 1181 pp.
- Kim, I., Yamashita, N., and Tanaka, H. 2009. Photodegradation of pharmaceuticals and personal care products during UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatments. Chemosphere. 77: 518-525.
- Klavarioti, M., Mantzavinos, D., and Kassinos, D. 2009. Removal of residual pharmaceuticals from aqueous systems by advanced oxidation processes. Environment International. 35: 402-417.
- Lin, C.H., Yu, R.F., Cheng, W.P., and Liu, C.R. 2012. Monitoring and control of UV and UV-TiO<sub>2</sub> disinfections for municipal wastewater reclamation using artificial neural networks. Journal of Hazardous Materials. 209-210: 348-354.
- Lucas, M.S., and Peres, J.A. 2009. Removal of COD from olive mill wastewater by Fenton's reagent: Kinetic study. Journal of Hazardous Materials. 168: 1253-1259.
- Norman, A.W., and Litwack, G. 1997. Hormones second edition. Academic press, San Diego, USA. , p 558.
- Overly, W. L., Dankoff, J.A., Wang, B., and Singh, U. 1984. Androgens and hepatocellular carcinoma in an athlete. Annals of Internal Medicine. 100: 158-159.
- Parsons, S. 2004. Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment. Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London, UK. pp 7-49.
- Reynolds, D.L., Gross, M.R., and Coomds, M.J. 1993. Environmental conditions and male morphology determine alternative mating behavior in Trinidadian Guppies. Animal Behaviour. The Association for Study of Animal Behaviour, Toronto, 145-52 pp.
- Roberts, J.T., and Essenhig, D.M. 1986. Adenocarcinoma of prostate in 40-year old body builder. Lancet 2: 742.
- Roberfroid, M. B. and Calderon, P. B. 1995. Free radicals and oxidation phenomena in biological systems. Marcel Dekker. Inc. New York., U.S.A.

- Shi-long, H., Li-ping, W., Jie, Z., and Mei-feng, H. 2009. Fenton pre-treatment of wastewater containing nitrobenzene using ORP for indicating the endpoint of reaction. Procedia Earth and Planetary and Planetary Science. 1: 1268-1274.
- Shie, J.L., Lee, C.H., Chiou, C.S., Chang, C.T., Chang, C.C. and Chang, C.Y. 2007. Photodegradation kinetics of formaldehyde using light sources of UVA, UVC and UVLED in the presence of composed silver titanium oxide photocatalyst. Hazardous Materials. 155: 164-172.
- Soe, KL., Soe, M., and Gluud, C. 1992. Liver pathology associated with the use of anabolicandrogenic steroids. Liver International. 12: 73-9.
- Stumpe, B., and Marschner, B. 2007. Long-term sewage sludge application and wastewater irrigation on the mineralization and sorption of 17  $\beta$ -estradiol and testosterone in soils. Science of the Total Environment. 374: 282–291.
- Thomas, J. E., Carroll, R., Sy, L. P. and Watanabe, M. 1989 Isolation and characterization of a 50 kDa testosterone-binding protein from *Pseudomonas testosteroni*. Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology. 32: 27-34.
- Vulliet, E., Falletta, M., Marote, P., Lomberget, T., Paisse, J.O., and Loustalot, M.F.G. 2010. Light induced degradation of testosterone in waters. Science of the Total Environment. 408: 3554-3559.
- Wang, K., Guo, J., Yang, M., Junji, H., and Dang, R. 2009. Decomposition of two haloacetic acids in water using UV radiation ozone and advanced oxidation processes. Journal of Hazardous Materials. 162: 1243-1248.
- Yamamoto, T. 1958. Artificial inductional sex-reversal in genotypic females in the Medaka (*Oryzias Latipes*). J of Exp. Zool 137(2): 227-264.
- Zuo, Y., Zhang, K., and Deng, Y. 2006. Occurrence and photochemical degradation of 17 $\alpha$ -ethinylestradiol in Acushnet River Estuary. Chemosphere. 63: 1583-1590.
- Zhang, Y., Zhou, J.L., and Ning, B. 2007. Photodegradation of estrone and 17 $\beta$ -estradiol in water. Water Research. 41: 19-26.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง

1. เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) (เทคนิค High Performance Liquid Chromatography) (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ : ออนไลน์)

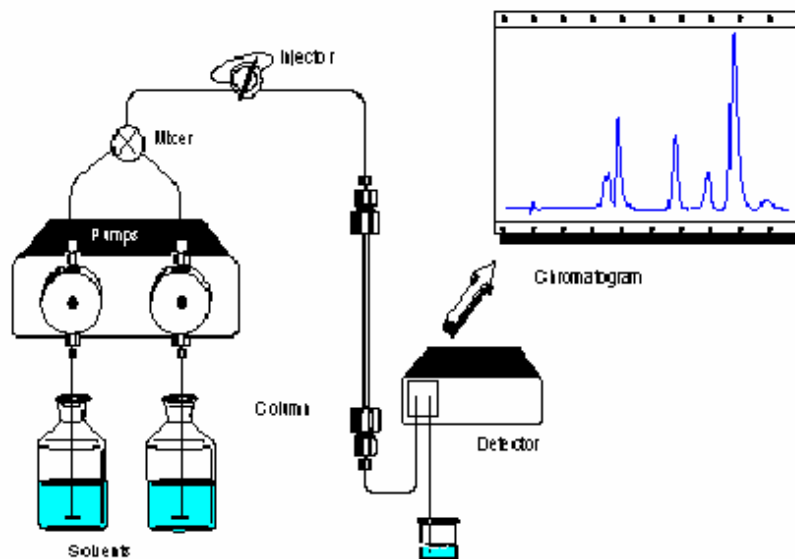


ภาพที่ ก.1 เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง

(High Performance Liquid Chromatography: HPLC) ([www.ndeanly.com](http://www.ndeanly.com))

ที่มา: (ออนไลน์) (18 ธันวาคม 2554)

เครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (High Performance Liquid Chromatography: HPLC) เป็นเครื่องมือใช้สำหรับแยกสารประกอบที่สนใจที่ผสมอยู่ในตัวอย่าง โดยกระบวนการแยกสารประกอบที่สนใจจะเกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส คือ เฟสอยู่กับที่ (Column) กับเฟสเคลื่อนที่ (Mobile Phase) จะถูกแยกออกมาในเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งสารผสมที่อยู่ในตัวอย่างสามารถถูกแยกออกจากกันได้นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการเข้ากันได้ดีของสารนั้นกับเฟสที่เคลื่อนที่ หรือ เฟสอยู่กับที่ สารประกอบตัวไหนที่สามารถเข้ากันได้ดีกับเฟสที่เคลื่อนที่ สารนั้นก็จะถูกแยกออกมา ก่อน ส่วนสารที่เข้ากันได้ไม่ดีกับเฟสที่เคลื่อนที่ หรือเข้ากันได้ดีกับเฟสอยู่กับที่ ก็จะถูกแยกออกมาทีหลัง โดยสารที่ถูกแยกออกมาได้นี้จะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจวัดสัญญาณที่บันทึกได้จากตัว ตรวจวัดจะมีลักษณะเป็นพีค ซึ่งจะเรียกว่า โครมาโตแกรม



ภาพที่ ก.2 ส่วนประกอบของเครื่อง HPLC

ที่มา: (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ : ออนไลน์) (18 ธันวาคม 2554)

### ส่วนประกอบหลักของเครื่อง HPLC ประกอบด้วย

1. Mobile Phase / Solvent : ตัวทำละลายที่ใช้ในการชะหรือแยกตัวอย่าง เป็นเฟสเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นของเหลว ทำหน้าที่ในการนำสารตัวอย่างและตัวทำละลายเข้าสู่ เฟสที่อยู่กับที่ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ ซึ่งกระบวนการแยกจะเกิดขึ้นภายในคอลัมน์
2. Pump : ทำหน้าที่ดึงตัวทำละลายซึ่งทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบ HPLC
3. Injector / Autosampler : ทำหน้าที่ในการฉีดสารตัวอย่างเข้าระบบ HPLC
4. Column : ภายในบรรจุด้วยเฟสที่อยู่กับที่ มีลักษณะเป็นของแข็งหรือเจล ทำให้เกิดกระบวนการแยกองค์ประกอบของสารที่สนใจ โดยกระบวนการแยกเกิดขึ้นระหว่างเฟสที่ เคลื่อนที่กับ เฟสที่อยู่กับที่
5. Detector : เป็นตัวตรวจวัดสัญญาณ ทำหน้าที่ในการตรวจวัดสัญญาณของสารที่สนใจที่ได้จากกระบวนการแยก HPLC สามารถทดสอบได้ทั้งเชิงคุณภาพ และทดสอบเชิงปริมาณ โดยการ เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

2. **เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis Spectrophotometer)** (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ : ออนไลน์)



**ภาพที่ ก.3** เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV- Vis spectrophotometer)

ที่มา: (ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ : ออนไลน์) (18 ธันวาคม 2554)

UV – Vis spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาว ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับ ปริมาณ และ ชนิดของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้

### หลักการของเครื่อง UV – Vis Spectrophotometer

ความยาวคลื่นที่ใช้งานในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) คือ ความยาวคลื่น 190 - 400 นาโนเมตร ส่วนความยาวคลื่นช่วงวิสิเบิล (Visible) คือ ความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร เมื่อสารเกิดการดูดกลืนความยาวคลื่น พลังงานที่ดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสภาวะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) โดยปริมาณการดูดกลืนความยาวคลื่นช่วง UV-Vis นี้ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร

เมื่อแสงที่อยู่ในช่วงยูวี – วิสิเบิลผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสาร สารนั้นจะดูดกลืนแสงเฉพาะบางช่วงทำให้เกิดมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Electronic Transition) ซึ่งโดยมากจะใช้พลังงานประมาณ 30 – 150 Kcal/mole และอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง คืออิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดหรืออิเล็กตรอนที่เกิดพันธะแล้ว หรืออิเล็กตรอนที่ยังไม่เกิดพันธะ (Non – Bonding Electrons) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีพลังงานต่างกัน อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงขึ้นนี้เรียกว่า Antibonding Orbitals

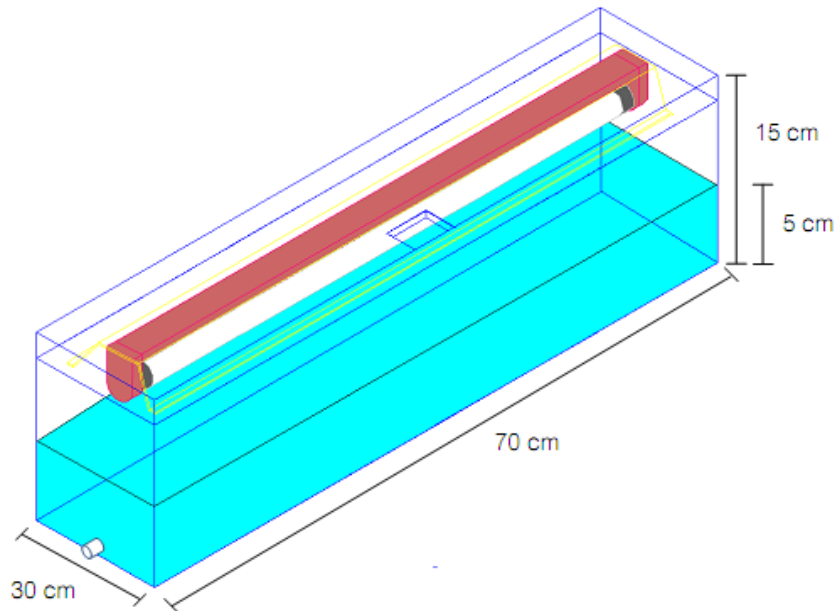
### ส่วนประกอบของเครื่อง UV – Vis Spectrophotometer

1. แหล่งกำเนิดรังสี : Deuterium Lamp & Tungsten Lamp
2. Monochromator : แยกคลื่นรังสีให้เหลือเป็นความยาวคลื่นเดียว
3. เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง
4. Detector : วัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืน โดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า
5. เครื่องแสดงค่า : เปลี่ยนสัญญาณที่มาจาก Detector เป็นค่าที่ใช้งาน

ภาคผนวก ข

รายการคำนวณ

## 1. การคำนวณถังปฏิบัติการ



ภาพที่ ข.1 ถังปฏิบัติการ

### ขนาดหลอดจริง

ความยาวหลอด 60.4 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร

### ขนาดคอมส่ท่อนแสง

ความยาว 65 เซนติเมตร ความกว้าง 25 เซนติเมตร

### ความยาว

ความยาวคอมส่ท่อนแสง 65 เซนติเมตร + ระยะห่างจากคอมส่ท่อนแสงถึงขอบข้างละ 2.5 เซนติเมตร = 70 เซนติเมตร

### ความกว้าง

ความกว้างคอมส่ท่อนแสง 25 เซนติเมตร + ระยะห่างจากหลอดถึงขอบข้างละ 2.5 เซนติเมตร = 30 เซนติเมตร



ถังปฏิบัติการปริมาตรน้ำ 10 ลิตร (1 ลิตร = 1,000 มิลลิลิตร)

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้า} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \\
 10,000 \text{ ml} &= 30 \times 70 \times \text{สูง} \\
 \text{ความสูง} &= 4.7 \text{ เซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

### ความสูง

ความสูงน้ำ 4.7 เซนติเมตร ประมาณ 5 เซนติเมตร จากน้ำถึงขอบ 10 เซนติเมตร

ดังนั้นความสูงทั้งหมด 15 เซนติเมตร

### ดังนั้น

ถังปฏิบัติการมีขนาด ความกว้าง 30 เซนติเมตร ความยาว 70 เซนติเมตร ความสูง 15 เซนติเมตร

## 2. การคำนวณปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต

**สูตร** ปริมาณการใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร)

$$= \frac{\text{ความเข้มขึ้นของแสง (วัตต์)} \times \text{เวลา (วินาที)}}{\text{พื้นที่รับแสง (ตารางเซนติเมตร)}}$$

**ตัวอย่างการคำนวณ UV-C ที่เวลา 15 นาที**

$$\begin{aligned}
 &= \frac{20 \text{ วัตต์} \times (15 \times 60) \text{ วินาที}}{(30 \times 70) \text{ ตารางเซนติเมตร}} \\
 &= 8.57 \text{ วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร (9 วัตต์-วินาทีต่อตารางเซนติเมตร)}
 \end{aligned}$$

### 3. การคำนวณพลังงานที่ใช้ (w)

สูตร พลังงานที่ใช้ (วัตต์-วินาที)

$$= \text{กำลังวัตต์ (วัตต์)} \times \text{เวลา (วินาที)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์

ต้องการสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนให้ความเข้มข้นลดลงร้อยละ 90

ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ไมโครกรัมต่อลิตร

ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา = 0.286 ต่อนาที

หาเวลาที่ใช้ในการสลาย

$$\text{สูตร } C = C_0 e^{-kt}$$

C = ความเข้มข้นที่เหลือ

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น

K = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา

t = เวลาในการสลาย

$$\text{แทนค่า } 10 = 100 e^{-(0.286)t}$$

$$10/100 = e^{-(0.286)t}$$

$$\ln 0.1 = -0.286t \ln e \quad ; (\ln e = 1)$$

$$-2.30 = -0.286t$$

$$t = 8.04 \text{ นาที (9 นาที)}$$

พลังงานที่ใช้ (วัตต์-วินาที)

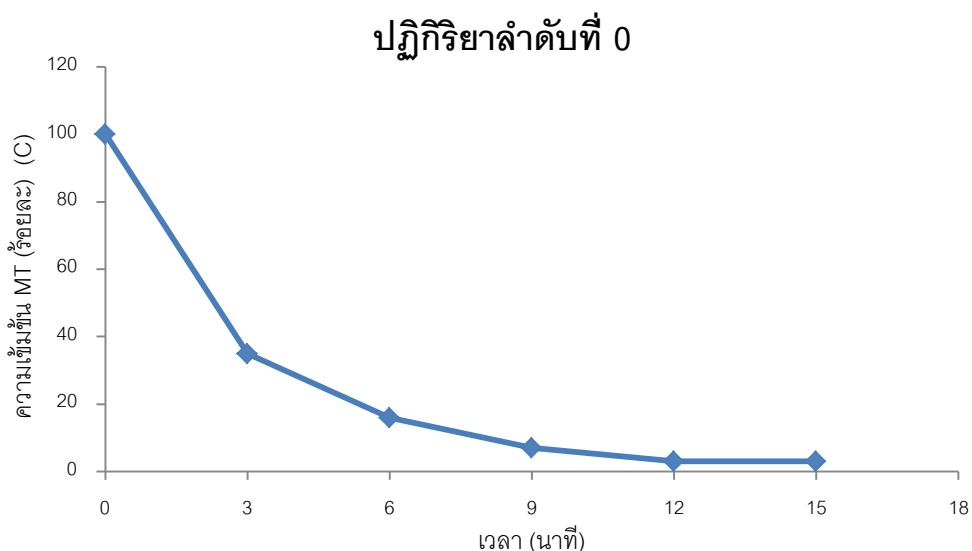
$$= 20 \text{ วัตต์} \times (9 \times 60) \text{ วินาที}$$

$$= 10,800 \text{ (วัตต์-วินาที)}$$

#### 4. การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์

ตัวอย่างการคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของ UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ สำหรับการทดลองในครั้งที่ 1

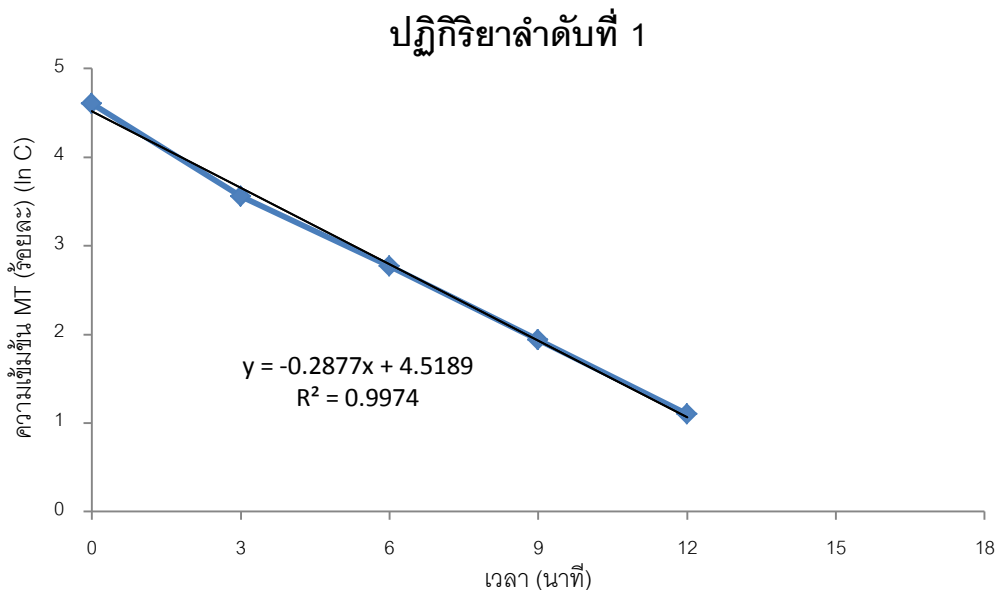
1. สร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (C) ที่วัดจากเครื่องแยกวิเคราะห์สารประสิทธิภาพสูง (HPLC) กับเวลาในการเก็บตัวอย่าง จากกราฟเส้นกราฟที่แสดงไม่เป็นเส้นตรง แสดงว่าไม่เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 0 แสดงดังภาพที่ ข.2



**ภาพที่ ข.2** การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ ปฏิกิริยาลำดับที่ 0

2. เมื่อค่าทางจลนพลศาสตร์ไม่เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 0 จึงทำการสร้างกราฟระหว่างความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน (ln C) กับเวลาในการเก็บตัวอย่าง จากกราฟเส้นกราฟที่แสดงเป็นเส้นตรง แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 แสดงดังภาพที่ ข.3

3. คำนวณค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาจากความชันของกราฟ โดยตัดความเข้มข้นที่เวลา 15 นาทีออก เนื่องจากช่วงเวลานี้ลักษณะกราฟในภาพ ข.2 มีแนวโน้มคงที่



ภาพที่ ข.3 การคำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ ปฏิกิริยาลำดับที่ 1

4. จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าทางจลนพลศาสตร์ของ UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ สำหรับการทดลองในครั้งนี้ 1 เป็นปฏิกิริยาลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา คือ 0.288 ต่อนาที
5. คำนวณค่าทางจลนพลศาสตร์ของ UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ จากการทดลองทั้ง 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเฉลี่ย

ตารางที่ ข.1 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของช่วงความยาวคลื่น UV-A

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (K) ต่อนาที (min <sup>-1</sup> )
UV-A	18	-
	40	-

ตารางที่ ข.2 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของช่วงความยาวคลื่น UV-B

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (K) ต่อนาที ( $\text{min}^{-1}$ )
UV-B	10	0.004
	18	0.016
	36	0.040

ตารางที่ ข.3 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของช่วงความยาวคลื่น UV-C

ช่วงความยาวคลื่น	กำลังวัตต์ (วัตต์)	ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (K) ต่อนาที ( $\text{min}^{-1}$ )
UV-C	10	0.070
	20	0.286
	40	0.511

## 5. การคำนวณชุดยูวีบำบัด

ตัวอย่างการนำผลการศึกษามาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำที่มี 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนตกค้างจากบ่อเลี้ยงปลา โดยทำการเติมน้ำลงในบ่อเลี้ยงปลาด้วยปั้มน้ำ เมื่อระดับน้ำในบ่อเลี้ยงปลาสูงขึ้นน้ำจะไหลออกทางรูน้ำล้น ไปยังถังกรองทรายแล้วไหลลงในบ่อพักน้ำ จากนั้นน้ำจากบ่อพักน้ำจะไหลเข้าสู่ชุดยูวีบำบัด โดยไหลผ่านรูออริฟิตซึ่งมีอัตราไหล 50 ลิตรต่อนาที ซึ่งชุดยูวีบำบัดเป็นระบบไหลต่อเนื่อง มีขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 18 เมตร 20 เซนติเมตร และความสูง 15 เซนติเมตร โดยระดับน้ำสูง 5 เซนติเมตร ด้านบนติดตั้งหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์ จำนวน 56 หลอด โดยหลอดยูวีห่างจากผิวน้ำ 10 เซนติเมตร และมีระยะเวลาพักเก็บอย่างน้อย 9 นาที จากนั้นน้ำจะไหลไปยังบ่อปั้มน้ำ โดยน้ำจากบ่อปั้มน้ำจะไหลเข้าสู่บ่อเลี้ยงปลาและใช้ในระบบต่อไป

$$\text{สูตร } Q = \frac{V}{t}$$

$Q$  = อัตราไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)

$V$  = ปริมาตรชุดยูวีบำบัด (ลูกบาศก์เมตร)

$t$  = ระยะเวลาพักเก็บ (นาที)

กำหนด  $Q = 0.05$  ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

$t = 9$  นาที (จากตารางที่ 4.5)

$$\text{แทนค่า } 0.05 = \frac{V}{9}$$

$$V = 0.05 \times 9$$

$$V = 0.45 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

ปริมาตรถัง = ความกว้าง x ความยาว x ความสูง

ความกว้างกำหนดจาก ขนาดของโคมสะท้อนแสง 2 โคม 50 เซนติเมตร (0.5 เมตร)

ความสูงกำหนดจากระดับที่ต้องการบ้ำบัด 5 เซนติเมตร (0.05 เมตร)

#### หาความยาว

$$\begin{aligned} \text{ความยาว} &= \frac{0.45}{0.5 \times 0.05} \\ &= 18 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

จากความยาวของโคมสะท้อนแสง 0.65 เมตร จะได้จำนวนโคม =  $18 / 0.65 = 27.69$  แกว

#### ดังนั้น

จึงเลือกใช้ 28 แกว ทำให้ได้ความยาวของขนาดชุดยูวีบ้ำบัด 18 เมตร 20 เซนติเมตร

และใช้จำนวนโคมสะท้อนแสง  $28 \times 2 = 56$  โคม (หลอดไฟ 56 หลอด)

ภาคผนวก ค

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของ  
กระบวนการ Solid Phase Extraction



ตารางที่ ค.1 ค่า % recovery ของสารในภาชนะ (Cartridge) ที่ใช้และตัวชะละลายต่างๆ

Cartridge	ตัวชะละลาย	% recovery						SD	%RSD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย		
C 18	อะซีโตไนไตรล์	171.75	101.47	123.35	122.80	111.56	126.19	27.02	21.41
	เมทานอล	153.64	89.10	120.59	118.06	138.49	123.97	26.40	21.29
Oasis HLB	อะซีโตไนไตรล์	104.41	93.15	115.93	119.27	119.35	110.42	11.43	10.35
	เมทานอล	116.04	96.35	126.06	123.41	121.81	116.73	11.97	10.26
PEP	อะซีโตไนไตรล์	116.49	94.61	106.70	118.71	123.37	111.98	11.46	10.23
	เมทานอล	109.98	95.51	113.15	116.97	119.98	111.12	9.51	8.56

ตารางที่ ค.2 ค่า % recovery ของอัตราส่วนต่างๆ สำหรับการเพิ่มความเข้มข้นของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ชุดการทดลองที่	ปรับสภาพภาชนะที่ใช้(ml)			ตัวอย่าง (ml)	ปริมาณน้ำล้าง (ml)	ตัวทำละลาย(ml)	% recovery				SD	%RSD
	เอทิลอะซีเตท	อะซีโตนไไตรล์	น้ำ				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1	5	5	5	20	5	5	98.76	99.54	100.87	99.72	1.07	1.07
2	5	5	5	20	5	10	107.01	102.35	108.62	105.99	3.26	3.07
3	5	5	5	20	5	20	70.68	76.77	72.98	73.48	3.08	4.19
4	5	5	5	20	10	20	84.3	100.76	77.18	87.41	12.09	13.84
5	5	5	5	20	20	5	62.31	68.26	70.81	67.13	4.36	6.50
6	5	5	5	20	20	10	93.13	98.07	87.91	93.04	5.08	5.46
7	5	5	5	20	20	20	81.31	105.98	97.67	94.99	12.55	13.21
8	5	5	10	20	5	5	98.41	101.78	98.06	99.42	2.05	2.07
9	5	5	10	20	5	10	101.49	104.57	109.84	105.30	4.22	4.01
10	5	5	10	20	20	10	94.17	85.69	97.66	92.51	6.16	6.65

ตารางที่ ค.3 ค่า % recovery ของกรดนาไลดีซิกและ17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนในการวิเคราะห์ internal standard

สาร	% recovery				SD	%RSD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
MT	59.8	57.75	62.19	59.91	2.22	3.71
NAL	69	72.85	63.48	68.44	4.71	6.88

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองการวัดปริมาณความเข้มข้น  
ของ 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน

ตารางที่ ง.1 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนของชุดควบคุม

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาท)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	15	100	100	100	100	0	0	
3	30	100	100	100	100	0	0	
4	60	100	100	100	100	0	0	
5	120	100	100	100	100	0	0	
6	240	100	100	100	100	0	0	
7	360	100	100	100	100	0	0	
8	480	100	100	100	100	0	0	
9	600	100	100	100	100	0	0	

ตารางที่ ง.2 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาที)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	60	100	100	100	100	0	0	
3	120	100	100	100	100	0	0	
4	180	100	100	100	100	0	0	
5	240	100	100	100	100	0	0	
6	300	100	100	100	100	0	0	
7	360	100	100	100	100	0	0	
8	420	100	100	100	100	0	0	
9	480	100	100	100	100	0	0	
10	540	100	100	100	100	0	0	
11	600	100	100	100	100	0	0	

ตารางที่ ง.3 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาที)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	60	99.21	99.24	99.25	99.23	0.02	0.77	
3	120	98.23	98.20	98.18	98.20	0.03	1.80	
4	180	97.50	97.45	97.52	97.49	0.04	2.51	
5	240	96.87	96.78	96.99	96.88	0.11	3.12	
6	300	96.29	96.28	96.30	96.29	0.01	3.71	

ตารางที่ ง.4 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาท)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	30	93.34	93.70	93.06	93.37	0.32	6.63	
3	60	85.75	85.42	85.19	85.45	0.28	14.55	
4	90	71.87	70.91	71.94	71.57	0.58	28.43	
5	120	65.54	64.27	64.64	64.82	0.65	35.18	
6	150	57.98	58.88	58.65	58.50	0.47	41.50	SPE
7	180	47.92	43.55	45.41	45.63	2.19	54.37	SPE
8	210	40.09	38.67	39.83	39.53	0.76	60.47	SPE
9	240	37.84	34.97	34.97	35.93	1.66	64.07	SPE
10	270	30.01	31.11	31.62	30.91	0.82	69.09	SPE
11	300	27.92	28.26	30.97	29.05	1.67	70.95	SPE



ตารางที่ ง.5 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาท)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	15	81.39	81.02	80.75	81.05	0.32	18.95	
3	30	63.53	62.98	63.12	63.21	0.29	36.79	SPE
4	45	50.52	51.14	51.23	50.96	0.39	49.04	SPE
5	60	41.98	41.23	39.87	41.03	1.07	58.97	SPE
6	75	32.4	31.96	30.67	31.68	0.90	68.32	SPE
7	90	25.21	25.22	23.12	24.52	1.21	75.48	SPE
8	105	20.29	19.31	18.85	19.48	0.74	80.52	SPE
9	120	15.15	15.23	15.64	15.34	0.26	84.66	SPE

ตารางที่ ง.6 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาที)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	10	71.90	70.38	70.37	70.88	0.88	29.12	
3	20	44.27	45.45	44.25	44.66	0.69	55.34	SPE
4	30	29.69	28.65	29.51	29.28	0.56	70.72	SPE
5	40	19.23	19.35	19.29	19.29	0.06	80.71	SPE
6	50	12.22	13.81	14.94	13.66	1.37	86.34	SPE
7	60	9.19	9.03	10.30	9.51	0.69	90.49	SPE

ตารางที่ ง.7 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาท)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0.00	
2	5	74.64	70.71	72.25	72.53	1.98	27.47	
3	10	48.57	48.48	48.15	48.40	0.22	51.60	SPE
4	15	34.54	33.25	34.78	34.19	0.82	65.81	SPE
5	20	23.29	23.21	23.18	23.23	0.06	76.77	SPE
6	25	19.55	16.41	16.58	17.51	1.77	82.49	SPE
7	30	13.08	12.27	11.88	12.41	0.61	87.59	SPE

ตารางที่ ง.8 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาที)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0	
2	3	35.00	36.74	36.43	36.06	0.93	63.94	SPE
3	6	15.91	15.36	16.54	15.94	0.59	84.06	SPE
4	9	6.94	6.25	7.59	6.93	0.67	93.07	SPE
5	12	3.00	3.10	3.26	3.12	0.13	96.88	SPE
6	15	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	-	-	SPE

ตารางที่ ง.9 ผลการวัดความเข้มข้น 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรนหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์

ลำดับที่	เวลาเก็บ (นาที)	ความเข้มข้น MT ที่เหลือ (ร้อยละ)				SD	อัตราการสลาย (ร้อยละ)	หมายเหตุ
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย			
1	0	100	100	100	100	0	0.00	SPE
2	2	34.85	33.7	34.76	34.44	0.64	65.56	SPE
3	4	13.33	12.49	13.55	13.12	0.56	86.88	SPE
4	6	5.51	4.85	3.61	4.66	0.96	95.34	SPE
5	8	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	-	-	SPE
6	10	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	-	-	SPE
7	12	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	ต่ำกว่า 3	-	-	SPE

ภาคผนวก จ

ผลการวัดคุณหมื่นของน้ำในถังปฏิบัติการ

ตารางที่ ๑.1 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยาของชุดควบคุม

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	26.1	27.3	27.2
2	15	26.1	27.3	27.2
3	30	26.1	27.3	27.2
4	60	26.1	27.3	27.2
5	120	26.1	27.3	27.2
6	240	26.1	27.4	27.2
7	360	26.1	27.3	27.2
8	480	26.1	27.3	27.2
9	600	26.1	27.3	27.2

ตารางที่ ๑.2 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	27.1	26.9	27.2
2	60	27.5	27.3	27.6
3	120	28.2	28.0	28.1
4	180	28.8	28.5	28.5
5	240	29.5	29.3	29.2
6	300	30.1	30.0	29.9
7	360	30.4	30.4	30.3
8	420	30.7	30.9	30.6
9	480	31.0	31.4	30.8
10	540	31.3	31.6	31.0
11	600	31.4	31.8	31.2



ตารางที่ ๑.3 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	25.0	28.1	27.6
2	60	25.4	28.5	28.0
3	120	26.1	29.2	28.7
4	180	26.8	29.9	29.6
5	240	27.4	30.5	30.2
6	300	28.1	31.2	30.9

ตารางที่ ๑.4 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	28.0	28.0	27.6
2	30	28.0	28.0	27.6
3	60	28.1	28.1	27.7
4	90	28.1	28.2	27.8
5	120	28.3	28.4	27.9
6	150	28.5	28.6	28.1
7	180	28.7	28.8	28.3
8	210	29.0	29.0	28.6
9	240	29.1	29.1	28.8
10	270	29.3	29.3	29.0
11	300	29.5	29.5	29.2

ตารางที่ ๑.5 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	28.5	27.5	27.7
2	15	28.6	27.5	27.8
3	30	28.7	27.6	28.0
4	45	28.9	27.8	28.1
5	60	29.1	28.0	28.2
6	75	29.3	28.2	28.5
7	90	29.5	28.5	28.8
8	105	29.8	28.8	28.9
9	120	30.1	29.0	29.4

ตารางที่ ๑.6 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	28.0	28.2	26.5
2	10	26.1	28.3	26.6
3	20	26.2	28.5	26.7
4	30	26.4	28.7	26.9
5	40	26.6	28.8	27.2
6	50	26.8	29.0	27.5
7	60	27.0	29.2	27.8

ตารางที่ ๑.7 อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดอุณหภูมิ (นาที)	อุณหภูมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	27.5	27.8	27.7
2	5	27.6	27.9	27.8
3	10	27.7	28.0	27.9
4	15	27.8	28.1	28.0
5	20	27.9	28.2	28.1
6	25	28.0	28.3	28.2
7	30	28.1	28.4	28.3

ตารางที่ ๑.8 คุณหมุมิของน้ำในถังปฏิกิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัดคุณหมุมิ (นาที)	คุณหมุมิของน้ำในถังปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	26.4	27.2	27.3
2	3	26.4	27.2	27.3
3	6	26.5	27.2	27.4
4	9	26.5	27.3	28.4
5	12	26.5	27.3	28.5
6	15	26.5	27.3	28.5

ตารางที่ ๑.9 คุณหมุมิของน้ำในถังปฏิริยาหลังทำการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์

ลำดับที่	เวลาวัตคุณหมุมิ (นาที)	คุณหมุมิของน้ำในถังปฏิริยา (องศาเซลเซียส)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
1	0	25.6	27.1	27.4
2	2	25.6	27.1	27.4
3	4	25.6	27.1	27.4
4	6	25.6	27.1	27.4
5	8	25.6	27.1	27.4
6	10	25.6	27.1	27.4
7	12	25.7	27.1	27.4

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอิสระในน้ำ



ตารางที่ ๑.1 ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับวิธีการทดลองที่ 1

อัตราส่วน (มิลลิลิตร)		ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)					
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
0.1	9.9	27.3	32.2	30.2	29.3	27.4	29.28
0.2	9.8	29.2	34.3	32.4	31.3	29.2	31.28
0.3	9.7	-	38.4	32.5	35.2	33.3	34.85
0.4	9.6	39.6	-	33.4	32.3	39.4	36.18
0.5	9.5	48.2	53.2	51.3	50.4	-	50.78

ตารางที่ ๑.2 ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตสำหรับวิธีการทดลองที่ 2

อัตราส่วน (มิลลิลิตร)		ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟต (มิลลิลิตร)			
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	9.9	30.3	32.4	30.6	31.1
0.2	9.8	33.7	34.7	33.7	34.0
0.3	9.7	36.4	36.8	38.4	37.2
0.4	9.6	42.8	43.4	44.2	43.5
0.5	9.5	50	51.3	52.7	51.3

ตารางที่ ๓.3 ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH

อัตราส่วน (มิลลิลิตร)		ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH			
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	น้ำ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.05	1.95	0.897	0.895	0.892	0.895
0.1	1.9	0.886	0.88	0.875	0.881
0.2	1.8	0.749	0.743	0.736	0.743
0.3	1.7	0.702	0.696	0.688	0.695
0.4	1.6	0.635	0.627	0.619	0.627
0.5	1.5	0.624	0.62	0.615	0.62
1.0	1.0	0.441	0.435	0.427	0.434

ตารางที่ ๑.4 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 18 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิโวลต์)			SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิโวลต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	1	1	1	0.00	1	0	0.5	0.71
240	1	1	1	0.00	1	0	0.5	0.71
360	1	1	1	0.00	1	0	0.5	0.71
480	1	1	1	0.00	1	0	0.5	0.71
600	1	1	1	0.00	1	0	0.5	0.71

ตารางที่ ๑.5 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-A กำลังวัตต์ 40 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิโวลต์)			SD	ค่าศักย์ไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิโวลต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1	2	1.5	0.71	1	2	1.5	0.71
180	1	2	1.5	0.71	1	2	1.5	0.71
300	2	2	2	0	3	3	3	0

ตารางที่ ๖.6 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 10 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิโวลต์)			SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิโวลต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	2	1	1.5	0.71	3	2	2.5	0.71
120	3	2	2.5	0.71	7	6	6.5	0.71
180	5	5	5	0	10	10	10	0
240	7	9	8	1.41	13	12	12.5	0.71
300	9	11	10	1.41	15	16	15.5	0.71

ตารางที่ ๗.7 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 18 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิวัตต์)				SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิวัตต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0.00
30	3	4	4	3.67	0.58	9	11	10	1.41
60	10	13	9	10.67	2.08	23	24	23.5	0.71
90	14	15	16	15.00	1.00	30	30	30	0
120	19	17	19	18.33	1.15	35	36	35.5	0.71

ตารางที่ ๘.8 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-B กำลังวัตต์ 36 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิวัตต์)				SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิวัตต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	12	15	14	13.67	1.53	32	31	31.5	0.71
40	18	22	23	21	2.65	61	62	61.5	0.71
60	28	29	27	28	1	89	97	93	5.66



ตารางที่ ๑.9 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 10 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิโวลต์)				SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิโวลต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0.00	0	0	0	0	0.00
10	5	7	4	5.33	1.53	17	23	20	4.24
20	9	12	10	10.33	1.53	34	41	37.5	4.95
30	14	17	16	15.67	1.53	47	50	48.5	2.12

ตารางที่ ๑.10 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 20 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิโวลต์)				SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิโวลต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0	0.00
3	6	7	7	6.67	0.58	23	20	21.5	2.12
9	15	14	16	15.00	1.00	60	58	59	1.41
15	29	25	27	27.00	2.00	75	71	73	2.83

ตารางที่ จ.11 ค่าไออาร์พีของชุดควบคุมและน้ำตัวอย่างสำหรับการฉายแสงด้วยหลอด UV-C กำลังวัตต์ 40 วัตต์

เวลา (นาที)	ค่าไออาร์พีของชุดควบคุม (มิลลิโวลต์)				SD	ค่าไออาร์พีของน้ำตัวอย่าง (มิลลิโวลต์)			SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
2	8	7	7	7.33	0.58	41	39	40	1.41
4	18	15	19	17.33	2.08	60	65	62.5	3.54
8	25	29	27	27.00	2.00	92	88	90	2.83
12	36	38	39	37.67	1.53	129	127	128	1.41

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกัตตินาฏ สกุลสวัสดิพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ เรื่อง การย่อยสลาย 17 แอลฟา – เมทิลเทสโทสเตอโรน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 12 จัดที่ โรงแรมพูลแมน ขอนแก่น ราชา ออริคิด จังหวัดขอนแก่น ระหว่างวันที่ 27 ถึง 29 เดือน มีนาคม ปี 2556